(2) DI: 109530

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

Westerschelde - Oeververbinding

stroombeelden ter plaatse van de tunnelsleuf

verslag modelonderzoek

M 1734

juli 1981

C1327

(2)

BIBLIOTHEEK
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Postbus 20.000
3502 LA Utrecht

BIBLIOTHEEK BOUWDIENST RIJKSWATERSTAAT
NR. C.1327 BRL1

Westerschelde - Oeververbinding

stroombeelden ter plaatse van de tunnelsleuf

verslag modelonderzoek

M 1734

juli 1981

INHOUD

blz.

1. Inleiding 1
1.1 Probleemstelling en doel van het onderzoek 1
1.2 Opdracht 2
1.3 Samenvatting en konklusies 2

2. Modelaspekten 6
2.1 Beschrijving van het model 6
2.2 Meetmethoden 7

3. IJking van het model 8
3.1 Algemeen 8
3.2 Natuurmetingen 8
3.3 Resultaten 9

4. Stroombeeldonderzoek 13
4.1 Algemeen 13
4.2 Situatie met proefsleuf (T1) 13
4.3 Situatie na afzinken tunnelelement 1 (T2) 14
4.4 Situatie vóór afzinken van tunnelelement 4 (T3) 15
4.5 Situatie na afzinken van tunnelelement 4 (T4) 17
4.6 Situatie na afzinken van tunnelelement 7 (T5) 17
4.7 Situatie na afzinken van tunnelelement 10 (T6) 18

5. Ontgrondingsonderzoek 20

LITERATUUR

Tabellen

1 Natuurmetingen in de Westerschelde

Figuren

1 Situatie vaste oeververbinding Westerschelde

2 Langsdoorsnede Westerscheldetunnel

3 Overzicht model

IJking model (To)

4,5 Stroombeeld

6,7 Gemiddelde stroomsnelheden en stroomrichtingen

8,9 Stroomrichtingen volgens drijverbanen

10,11 Stroomsnelheidsverdelingen in ijkraaien

12 Stroomsnelheidsvertikalen in tracé-as

13 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 3

14 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 5

15 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 8

Situatie met proefsleuf (T1)

16 Situatie proefsleuf

17,18 Gemiddelde stroomsnelheden en stroomrichtingen

19,20 Stroomrichtingen volgens drijverbanen

21 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 2

22 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 2/3

23 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 3

24 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 3/4

Situatie na afzinken tunnelelement 1 (T2)

25,26 Gemiddelde stroomsnelheden en stroomrichtingen

27,28 Stroomrichtingen volgens drijverbanen

29 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 2

30 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 11

Situatie voor afzinken tunnelelement 4 (T3)

31,32 Gemiddelde stroomsnelheden en stroomrichtingen

33,34 Stroomrichtingen volgens drijverbanen

35,36 Stroomsnelheden en stroomrichtingen ter plaatse van tunneleind

37,38 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 8
39,40 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 9

Situatie na afzinken tunnelelement 4 (T4)

41,42 Gemiddelde stroomsnelheden en stroomrichtingen
43,44 Stroomrichtingen volgens drijverbanen
45,46 Stroomsnelheden en stroomrichtingen ter plaatse van tunneleind
47,48 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 7
49,50 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 8

Situatie na afzinken tunnelelement 7 (T5)

51,52 Gemiddelde stroomsnelheden en stroomrichtingen
53,54 Stroomrichtingen volgens drijverbanen
55,56 Stroomsnelheden en stroomrichtingen ter plaatse van tunneleind
57,58 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 4
59,60 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 5

Situatie na afzinken tunnelelement 10 (T6)

61,62 Gemiddelde stroomsnelheden en stroomrichtingen
63,64 Stroomrichtingen volgens drijverbanen
65,66 Stroomsnelheden en stroomrichtingen ter plaatse van tunneleind
67 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 2
68,69 Stroomsnelheidsvertikalen in langsraai 5
70 Tijd-ontgrondingslijn

Foto's

1 Overzicht van het model

2 Stroomsnelheidsmolen

3 Stroomrichtingsvaan

4 Stroomrichtingen langs bodem (T3, vloed)

5 Stroomrichtingen langs bodem (T3, eb)

6 Stroomrichtingen langs bodem (T4, vloed)

7 Stroomrichtingen langs bodem (T4, eb)

8 Stroomrichtingen langs bodem (T5, vloed)

9 Stroomrichtingen langs bodem (T5, eb)

10 Stroomrichtingen langs bodem (T16, vloed)

11 Stroomrichtingen langs bodem (T16, eb)

12 Ontgronding langs tunnelelement 4 (T4, vloed)

13 Ontgronding langs tunnelelement 4 (T4, eb)

14 Ontgronding langs tunnelelement 7 (T5, vloed)

Symbolen

d	diameter	(L)
h	waterdiepte	(L)
l	lengte	(L)
m	aantal tijdperioden in een getijfase	-
n	schaalfaktor	-
Q	debiet	$(L^3\ T^{-1})$
t	tijd	(T)
Δt	tijdperiode	(T)
u	lokale stroomsnelheid	$(L\ T^{-1})$
$\bar{u}$	gemiddelde stroomsnelheid	$(L\ T^{-1})$
$\bar{u}_{kr}$	gemiddelde stroomsnelheid bij begin van beweging	$(L\ T^{-1})$
α	geometriefaktor	-
Δ	specifieke dichtheid (onder water)	-
ρ	dichtheid van water	$(M\ L^{-3})$
ρ_s	dichtheid van bodemmateriaal	$(M\ L^{-3})$

WESTERSCHELDE-OEVERVERBINDING

STROOMBEELDEN TER PLAATSE VAN DE TUNNELSLEUF

1. Inleiding

1.1 Probleemstelling en doel van het onderzoek

Ter verbetering van de verbinding tussen Zeeuws-Vlaanderen en de rest van Nederland zal ten westen van de vaarroute van de veerdienst Kruiningen-Perkpolder een oeververbinding door de Westerschelde worden aangelegd. Het zuidelijk deel van deze verbinding zal bestaan uit een brug over de Schaar van Ossenisse. Het noordelijk deel, dat de scheepvaartroute naar de haven van Antwerpen kruist, zal echter als tunnel worden uitgevoerd (figuur 1). De tunnel zal bestaan uit twee landhoofden met de bijbehorende op- en afritten en een onder water gelegen tunnelgedeelte. Dit gedeelte, gesitueerd in de geul Overloop van Hansweert-Zuidergat, zal in 12 delen volgens de zinkmethode worden gebouwd. De elementen zijn 19,5 m breed, 9,15 m hoog en 174,67 m lang met uitzondering van de elementen 1 en 2 die 131 m lang zijn (figuur 2).

De elementen worden gebouwd in een bouwdok gelegen op een werkeiland dat voor de bouw van de vaste oeververbinding op de platen van Ossenisse zal worden gemaakt. Na de bouw van de elementen zal het bouwdok worden geopend en zullen de elementen drijvend (vrijboord = 0,2 m) via een gebaggerde geul naar de afzinkpositie in het tunneltracé worden gesleept en worden afgezonken.

Als gevolg van het maken van een werkeilend, het baggeren van een toegangsgeul naar het bouwdok op het werkeiland en het baggeren van de eigenlijke tunnelsleuf zal het stroombeeld ter plaatse van het tunneltracé aanzienlijke wijzigingen ondergaan. Voor een goed inzicht in de optredende stroomkrachten op de tunnelelementen, de optredende sedimentatie in de gebaggerde geulen en de mogelijke erosie ter plaatse van de afgezonken tunnelelementen moet het stroombeeld in het tracé tijdens de verschillende bouwfasen zowel in grootte als richting worden vastgelegd. Tevens is getracht een indruk te krijgen van de grootte van de mogelijke (drie-dimensionale) erosie rondom de kop van de afgezonken tunnelelementen in de verschillende bouwfasen door het uitvoeren van ontgrondingsonderzoek met een (lokaal aangebrachte) beweeglijke bodem bestaande uit polystyreenkorrels.

1.2 Opdracht

De N.V. Westerschelde-Oeververbinding heeft in een brief d.d. 4 augustus 1980, nr. 8672, het Waterloopkundig Laboratorium opdracht gegeven tot het uitvoeren van modelonderzoek volgens de aanbiedingen gedaan in brieven van 27 juni 1980 en 22 juli 1980 (kenmerk V5722 en V 6465).

De opdracht omvat het volgende onderzoekpakket.

1 IJking van het model.

2 Stroombeeldonderzoek voor het leveren van de randvoorwaarden voor de aanzandingsberekeningen voor de tunnelsleuf en het signaleren van drie-dimensionale effekten hierin. Tevens kunnen de gevonden stroombeelden worden gebruikt om de stroomkrachten te schatten, die tijdens het afzinken op de niet-onderzochte elementen zullen werken.

3 Bepalen van zandtransporten ter plaatse van het tunneltracé uit stroomsnelheids- en sedimentgehalteprofielen van natuurmetingen, die door de Adviesdienst Vlissingen zijn uitgevoerd.

4 Aanzandingsberekeningen voor de tunnelsleuf.

5 Bepalen van de stroomkrachten op een tunnelelement tijdens het transport naar en het afzinken in de tunnelsleuf, alsmede het gevaar voor het optreden van stoten tijdens het plaatsen van het element.

6 Bepalen van de krachten op de afgezonken en nog niet afgedekte tunnelelementen door passerende schepen.

7 Bepalen van de krachten op in het open bouwdok afgemeerde tunnelelementen door passerende schepen.

Het in dit verslag gerapporteerde onderzoek betreft het onder de punten 1 en 2 genoemde onderzoek. Dit deel van het onderzoekpakket is in de maanden augustus 1980 tot en met februari 1981 uitgevoerd in het Laboratorium De Voorst onder leiding van ir. L.C. van Rijn, projektingenieur van het Waterloopkundig Laboratorium. Hij stelde tevens dit verslag samen.

1.3 Samenvatting en konklusies

Het doel van het onderzoek was het vastleggen (in grootte en richting) van de stroombeelden ter plaatse van het tracé van het tunnelgedeelte van de vaste oeververbinding in de Westerschelde.
Om dit onderzoek te kunnen uitvoeren is een model (schaal 1:100) gemaakt, omvattende het gedeelte van de Westerschelde tussen Zuid-Beveland (Noord), het Zuidergat en de Schaar van Waarde (Oost), de Platen van Ossenisse (Zuid) en het Middelgat en de Overloop van Hansweert (West). Het onderzoek is uitgevoerd bij een permanente stroomtoestand overeenkomend met een normaal springtij (getijfaktor = getijverschil bij normaal springtij/getijverschil bij gemiddeld getij= 1,18). Het vloeddebiet was 43.000 m^3/s en het ebdebiet was 28.500 m^3/s. De bijbehorende waterstanden waren N.A.P. +2,12 m en N.A.P. +0,20 m.

De modelaspekten en de toegepaste meetmethoden zijn beschreven in hoofdstuk 2.

Om de stroming in de natuur zo goed mogelijk te reproduceren is het model geijkt aan natuurmetingen (tabel 1) in drie karakteristieke raaien (figuren 4 en 5). De uitvoering en de resultaten van de ijking (T0) zijn beschreven in hoofdstuk 3.

Het stroombeeldonderzoek, beschreven in hoofdstuk 4, omvat het vastleggen van de stroming (in grootte en richting) in een zestal situaties uit de verschillende bouwfasen, te weten:

1 T1: situatie met de proefsleuf,
2 T2: situatie met de toegangsgeul naar het bouwdok op het werkeiland en de sleuf na het afzinken van tunnelelement 1,
3 T3: situatie met de sleuf vóór het afzinken van tunnelelement 4,
4 T4: situatie met de sleuf na het afzinken van tunnelelement 4,
5 T5: situatie met de sleuf na het afzinken van tunnelelement 7,
6 T6: situatie met de sleuf na het afzinken van tunnelelement 10.

De resultaten van het stroombeeldonderzoek zijn weergegeven in de figuren 16...69 en de foto's 4...11.

Tenslotte is in hoofdstuk 5 getracht een indruk te geven van de plaats en de grootte van de ontgronding, die zal optreden als gevolg van het drie-dimensionale stroombeeld rondom de kop van een afgezonken tunnelelement tijdens de bouwfase.

De belangrijkste resultaten van het onderzoek zijn samengevat in onderstaande konklusies:

1 In alle ijkraaien is er een redelijk tot goede overeenstemming tussen de natuur- en modelmetingen, zowel tijdens de maximale vloed- als de ebstroom (figuren 4, 5, 10 en 11).

2 Als gevolg van de bouw van het werkeiland op de Platen van Ossenisse en het baggeren van de proefsleuf nemen de stroomsnelheden tijdens de vloedfase ter plaatse van de proefsleuf (raai E en D) enigszins toe (maximaal 5%). Tijdens de ebfase van het getij nemen de stroomsnelheden nabij het werkeiland (raai D) met ca. 20% toe (figuren 17 en 6, 18 en 7).

3 Het stroombeeld ter plaatse van de proefsleuf is drie-dimensionaal, met name tijdens de vloedstroom (figuren 17 en 19). Als gevolg hiervan zal de nauwkeurigheid van de twee-dimensionale (vertikale vlak) aanzandingsberekeningen voor de proefsleuf afnemen.

4 Als gevolg van het baggeren van de tunnelsleuf (toenemende waterdiepte) in het middendeel van de tracé-as kan het debiet, met name tijdens de vloedstroom, in dat deel van de geul enigszins (maximaal 10%) toenemen (figuren 31 en 6).

5 Ter plaatse van de toegangsgeul naar het bouwdok op het werkeiland treedt een drie-dimensionaal stroombeeld op met verschillen in stroomrichting nabij de bodem en het wateroppervlak, terwijl er langs het werkeiland (zwakke) neren ontstaan (figuren 25, 26, 27, 28, 33 en 34).

6 Het stroombeeld rondom de kop van een afgezonken tunnelelement is sterk driedimensionaal. Aan weerszijden van het tunnelelement treden langsstromen op met relatief grote stroomsnelheden, variërend van 0,3-0,7 m/s tijdens de vloedstroom en 0,2-0,5 m/s tijdens de ebstroom, terwijl aan de benedenstroomse zijde van het tunnelelement de bodem wordt aangevallen door grootschalige wervels, ontstaan in het turbulente loslaatgebied achter het tunnelelement (figuren 35, 36, 45, 46, 55, 56, 65, 66 en foto's 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

7 Als gevolg van de (drie-dimensionale) stromingen zal er aan weerszijden en aan de kop van een afgezonken tunnelelement aanzienlijke ontgronding optreden (foto's

12...14), indien geen beschermende maatregelen worden getroffen. Een zeer globale omrekening van de modelresultaten naar de natuur geeft een ontgrondingsdiepte na 1 dag (24 uur) in de orde van grootte van 1 m, oplopend tot ca. 4 m na 30 dagen.

8 Door ondergraving van de vijzels onder het tunnelelement kan de stabiliteit van het tunnelelement in gevaar komen, indien geen beschermende maatregelen worden getroffen.

2. Modelaspekten

2.1 Beschrijving van het model

Het modelonderzoek kon worden uitgevoerd in het model dat ten behoeve van het stroombeeldonderzoek voor de voorhaven van Hansweert was gebouwd in een der overdekte faciliteiten van het Laboratorium De Voorst en dat per 1 juli 1980 ter beschikking was. Dit model (schaal 1:100) omvatte het deel van de Westerschelde tussen Zuid-Beveland en de Platen van Ossenisse (noordelijke en zuidelijke begrenzing). De westelijke begrenzing van het model werd gevormd door het Middelgat en de Overloop van Hansweert, terwijl de oostelijke begrenzing werd gevormd door het Zuidergat en de Schaar van Waarde (figuur 3 en foto 1). Tevens waren in het model de veerhaven van Kruiningen en de voorhaven van Hansweert (bestaande situatie) aanwezig, althans voorzover van belang voor het stroombeeld ter plaatse van het tunneltracé.
Het onderzoek is uitgevoerd bij een permanente stromingstoestand, zowel voor de maximale eb- als vloedperioden. Om een zo goed mogelijk stroombeeld in te stellen, is tevens het kombergingsdebiet in de haven van Hansweert gereproduceerd. De bodemligging in het model was gebaseerd op peilkaarten van Rijkswaterstaat uit 1977 en 1979: nr. C 6.77.1345, C 6.79.175 en B 3.79.319.

Volgens de schaalregels van Froude gelden de volgende schaalfaktoren (prototype/model):

lengte : $n_l = 100$
diepte : $n_h = 100$
snelheid : $n_u = 10$
debiet : $n_Q = 100.000$

Het debiet in het model werd geregeld met behulp van een Romijn-stuw. Via een systeem van schuiven en toevoerleidingen werd een eb- of vloedstroom ingesteld (figuur 3). Waterstanden werden met behulp van peilnaalden gemeten.
Om een zo gelijkmatig mogelijke instroming van het model te bewerkstelligen waren langs de randen duikschotten met een spleetopening van 0,05 m aanwezig.
De verdeling van het debiet over de geulen werd geregeld met behulp van een (houten) roosterwerk.

2.2 Meetmethoden

In het model zijn de volgende grootheden gemeten:

- stroomsnelheden met een micro-molen (diameter = 0,015 m, aanloopsnelheid ≈ 0,03 m/s, meettijd = 100 s, zie foto 2),
- stroomrichtingen met een richtingsvaan (hoogte = 0,03 m, zie foto 3) en door het fotograferen van drijvers (hoogte = 0,04 m) en kleurstofsporen (kaliumpermangaat) langs de bodem.

In een aantal stroomtoestanden is getracht de stroomsnelheden langs de bodem (in de sleuf) vast te stellen door het fotograferen van bolletjes (diameter = 0,02 m, dichtheid = 1030 kg/m^3) tijdens hun beweging langs de bodem.
De snelheden nabij de bodem, gemeten met de micro-molen, zijn (vergelijkingsgewijs) onnauwkeurig door de afmeting van de propeller ten opzichte van de zone waarin grote snelheidsgradiënten optreden.

3. IJking van het model

3.1 Algemeen

Het doel van de ijking is om de stroming zowel in grootte als richting in de natuur en het model zo goed mogelijk met elkaar in overeenstemming te brengen. Dit kan worden bereikt door het zo goed mogelijk instellen van de stroomsnelheidsverdeling op de modelranden en het aanbrengen van de benodigde bodemruwheid.
Bij de ijking voor het onderzoek ten behoeve van de vaste oeververbinding is uitgegaan van een bodemligging volgens peilkaarten van 1977 en 1979, terwijl de haven van Hansweert volgens de bestaande toestand is weergegeven. De ijking is uitgevoerd voor twee (permanente) stroomtoestanden betreffende de maximum vloedstroom (1 uur voor hoog water) en de maximum ebstroom (3 uur na hoog water) van het normale springtij (getijfaktor 1,18). Het vloeddebiet in het model bedroeg ca. 43.000 m^3/s, terwijl het ebdebiet ca. 28.500 m^3/s was. De bijbehorende waterstanden zijn N.A.P. +2,12 m en N.A.P. +0,20 m.
Om het kombergingsdebiet in de haven van Hansweert te reproduceren werd in het model bij vloed een debiet van ca. 0,8 l/s onttrokken en bij eb een debiet van ca. 0,8 l/s toegevoegd.
De beddingruwheid in de natuur is gereproduceerd door het aanbrengen van grindkorrels (0,01 - 0,02 m) in de diepe delen (beneden N.A.P. -20m) van de geulen. De hoeveelheid benodigd voor een goede reproduktie van het stroombeeld bedroeg ca. 0,1 l/m^2. In het overig gedeelte van het model is de beddingruwheid gereproduceerd door de betonbodem van het model.

3.2 Natuurmetingen

Ten behoeve van de ijking van het model zijn in de Westerschelde in 1979 en 1980 een aantal stroommetingen uitgevoerd door de Adviesdienst Vlissingen van de Direktie Waterhuishouding en Waterbeweging van Rijkswaterstaat. De meetdata, de meetposities, de meetwaarden alsmede de weersomstandigheden tijdens de meetdagen zijn vermeld in tabel 1.
De gemeten stroomsnelheden zijn omgerekend naar die voor het normale springtij (getijfaktor 1,18) dat bij de ijking is ingesteld. Deze waarden zijn aangegeven in de figuren 4 en 5.

3.3 Resultaten

De reproduktie van de waterbeweging is beoordeeld op de grootte en richting van de stroomsnelheden in de meetpunten, de verdeling van de stroomsnelheid in de ijkraaien en de vorm van de snelheidsvertikalen in een aantal punten ter plaatse van de tracé-as. Bij de ijking van het model is de nadruk gelegd op het zo goed mogelijk reproduceren van de stroming ter plaatse van de tracé-as van de oeververbinding.

In de figuren 4 en 5 zijn de grootte en richting van de gemiddelde stroomsnelheid, gemeten in de natuur en het model, weergegeven. Tevens zijn in deze figuren de in het model gemeten drijverbanen aangegeven. De figuren 6...9 geven een meer gedetailleerd overzicht van de stroomsnelheden en -richtingen ter plaatse van de tracé-as. De gemiddelde stroomsnelheden in het model zijn bepaald door het meten van de stroomsnelheden op een hoogte van 0,35 h (h = waterdiepte) boven de bodem, hetgeen vooraf door het meten van een aantal snelheidsvertikalen was vastgesteld. De gemiddelde stroomrichtingen zijn eveneens op een hoogte van ca. 0,35 h boven de bodem bepaald.
De figuren 10 en 11 geven een overzicht van de verdeling van de stroomsnelheid (loodrechte komponent) in dwarsrichting in de drie ijkraaien.

Ten aanzien van de gemeten stroomsnelheden en -richtingen in de natuur en het model kan het volgende worden gesteld:

Vloed

Raai A: De overeenstemming tussen de stroomsnelheden gemeten in de natuur en het model is opmerkelijk goed. Dit blijkt vooral ook uit figuur 10. De maximale afwijking van de stroomsnelheden bedraagt ca. 10%. De grootste afwijking in de stroomrichtingen treedt op in de meetpunten IV en VII, wat verklaarbaar is gezien de positie van deze punten langs de randen van het Middelgat.

Raai B: (tracé) In het diepe gedeelte van de geul (meetpunten II, III, IV en V) is er eveneens een goede overeenstemming tussen de gemeten stroomsnelheden in de natuur en het model (zie ook figuur 10). Dit geldt ook voor de stroomrichtingen.

In meetpunt I is er in de natuur een duidelijk kleinere stroomsnelheid (0,45 m/s) gemeten dan in het model (0,8 m/s). Ook de stroomrichting wijkt duidelijk af. Opgemerkt moet worden dat de natuurmetingen in punt I en III op een andere datum zijn uitgevoerd dan de overige punten in raai B. Tijdens de metingen in punt I en III waren de weersomstandigheden aanzienlijk ongunstiger, met name tijdens de vloedmeting stond er een harde zuid-westelijke wind. Dit kan mogelijk een verklaring zijn voor de afwijkende stroomrichtingen in de punten I en III. Voor de extreem lage stroomsnelheid gemeten in punt I (natuur) zijn een tweetal verklaringen mogelijk. In de eerste plaats heeft de lokale waterdiepte zich gewijzigd als gevolg van plaatvallen welke na 1977 (datum peilkaarten) hebben plaatsgevonden. Ook als gevolg van afwijkingen in de positiebepaling van het meetpunt kunnen er verschillen in de lokale waterdiepte ontstaan. Ter plaatse van de plaatrand waar de lokale bodemhelling in dwarsrichting vrij steil verloopt, kan een geringe afwijking in de meetpositie een relatief grote afwijking in de waterdiepte en dus de stroomsnelheid tot gevolg hebben. Een tweede mogelijke verklaring is de aanwezigheid in de natuur van een vloedstroom over de Platen van Ossenisse, die na het passeren van de plaat in de hoofdstroom komt, waardoor de stroomsnelheden langs de plaatrand ter plaatse van meetpunt I enigszins worden gereduceerd. Afzonderlijke proeven hebben aangetoond dat door het aanbrengen van een sekundaire stroming over de plaat de stroomsnelheid in meetpunt I duidelijk afnam. Maar ook de stroomsnelheden in de meetpunten II en III namen daardoor af. Aangezien een goede reproduktie van de stroomsnelheden in de diepe delen van de geul voor het onderzoek de voorkeur verdient, is besloten de (sekundaire) stroming tijdens de vloedfase over de Platen van Ossenisse niet weer te geven in het model.

Raai C: Ook in deze raai zijn er duidelijke afwijkingen in het stroombeeld ter plaatse van de meetpunten I en II aanwezig. De stroomsnelheden, gemeten in de natuur, zijn duidelijk kleiner, terwijl de stroomrichtingen in de natuur duiden op de aanwezigheid van een sekundaire stroming over de plaat.

In de overige meetpunten is er een redelijk tot goede overeenstemming tussen de gemeten stroomsnelheden en -richtingen in de natuur en het model.

Eb

Raai C: De stroomsnelheden gemeten in de diepe delen van het Zuidergat en de Schaar van Waarde zijn enigszins te laag ten opzichte van de metingen in het model (zie de figuren 5 en 11). Ook het (berekende) totale debiet in de natuur door raai C is ca. 15% te laag ten opzichte van het debiet door raai A en B. Hiervoor is, ook na overleg met de Adviesdienst Vlissingen, geen bevredigende verklaring te geven. Wel moet worden opgemerkt dat de stroommetingen in raai C ruim een jaar later hebben plaatsgehad dan de overige metingen. Mogelijk heeft het lokale stroombeeld zich in die periode enigszins gewijzigd.

Raai B: (tracé) Ter plaatse van de tracé-as is er een opmerkelijk goede overeenstemming tussen de stroomsnelheden gemeten in de natuur en het model (figuren 5 en 11). Wat betreft de stroomrichtingen is de overeenstemming iets minder goed, met name in het meetpunt V.

Raai A: In het Middelgat zijn de stroomsnelheden gemeten in de natuur duidelijk kleiner dan in het model, met name in punt V. In de Overloop van Hansweert zijn de stroomsnelheden, gemeten in de natuur, juist enigszins hoger, met name in punt II. De overeenkomst tussen de stroomrichtingen is vrij goed met uitzondering van de meetpunten VI en VII waar sterke snelheidsgradiënten in dwarsrichting optraden als gevolg van de aanwezigheid van een neer benedenstrooms van de haven van Hansweert.

Figuur 12 geeft een overzicht van de vertikale stroomsnelheidsverdeling in een tweetal meetpunten (IV en V) ter plaatse van raai B (tracé-as). De natuurmetingen betreffen de stroomsnelheden gemeten tijdens de maximum vloedstroom (1 uur voor hoog water) en tijdens de maximum ebstroom (3 uur na hoog water). Uit de figuur blijkt een opmerkelijk goede overeenkomst tussen de snelheidsvertikalen in de natuur en het model, zowel voor vloed- als de ebstroom.
Opgemerkt moet worden dat in het model het onderste meetpunt is gekozen op 2,5 m boven de bodem als gevolg van de relatief grote afmeting van de mikro-molen (1,5 m op prototypeschaal), terwijl in de natuur het onderste meetpunt op 0,5 m boven de lokale bodem lag. Vergelijking van de stroomsnelheden in de onderste 2 à 3 meter is daarom niet goed mogelijk. Temeer daar individuele natuurmetingen dicht bij de bodem bij de aanwezigheid van beddingvormen (duinen) geen goed beeld geven van de gemiddelde omstandigheden langs de beddingvormen.

De figuren 13, 14 en 15 geven een overzicht van de snelheidsvertikalen gemeten (in het model) in de langsraaien 3, 5 en 8. De ligging van deze langsraaien is aangegeven in figuur 6.

4. Stroombeeldonderzoek

4.1 Algemeen

In totaal zijn een zestal situaties uit de verschillende bouwfasen van het tunnelgedeelte onderzocht, te weten:

1 T1: situatie met de proefsleuf
2 T2: situatie met de toegangsgeul naar het bouwdok op het werkeiland en de sleuf na het afzinken van tunnelelement 1
3 T3: situatie met de sleuf vóór het afzinken van tunnelelement 4
4 T4: situatie met de sleuf na het afzinken van tunnelelement 4
5 T5: situatie met de sleuf na het afzinken van tunnelelement 7
6 T6: situatie met de sleuf na het afzinken van tunnelelement 10

Ter plaatse van de tunnelsleuf zijn de stroomsnelheden gemeten in drie raaien, te weten raai B, D en E. Raai B was gelegen in de tracé-as van de tunnel, raai D en E bevonden zich op ca. 350 m aan weerszijden van de tracé-as. Per raai waren er 11 meetstations op onderlinge afstand van 150 m aanwezig (figuur 6).
In de raaien (D en E) aan weerszijden van de sleuf is de stroomsnelheid in vertikale richting in drie punten gemeten: op 2,5 m boven de bodem, op 0,35 h (h = waterdiepte) boven de bodem en op 4,5 m beneden de waterspiegel. In de sleuf zijn er 2 extra (tussengelegen) meetpunten genomen. De gemiddelde stroomsnelheid is bepaald door middeling van de snelheidsvertikaal.

4.2 Situatie met proefsleuf (T1)

Stroombeeld

Figuur 16 : situatie proefsleuf
Figuren 17 en 18: gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen
Figuren 19 en 20: stroomrichtingen volgens drijverbanen.

Als gevolg van de bouw van het werkeiland en het baggeren van de proefsleuf nemen de stroomsnelheden tijdens de vloedfase in het midden van raai E (E3, 4, 5, 6, 7, 8 en 9) enigszins toe (maximaal 5%). In de meetpunten 1 en 2 van raai E nemen de stroomsnelheden enigszins af (figuren 17 en 6). Tijdens de ebfase nemen

de stroomsnelheden in de meetpunten 1, 2, 3, 4 en 5 van raai D toe, met name nabij het werkeiland (maximaal 20%). In de overige meetpunten van raai D nemen de stroomsnelheden enigszins af (figuren 18 en 7).
Uit de stroommetingen blijkt dat de proefsleuf enigszins scheef wordt aangestroomd. De maximale afwijking bedraagt ca. 15°, zowel tijdens de vloed- als de ebstroom.
Tijdens de vloedstroom treedt er een aanzienlijke variatie op in de (dwars)verdeling van de stroomsnelheden ter plaatse van de proefsleuf (figuur 17). Ter plaatse van raai E varieert de gemiddelde stroomsnelheid van 0,69 m/s tot 2,02 m/s over een afstand van ca. 500 m. Ook zijn er duidelijke verschillen in de richting van de stroomsnelheden nabij het wateroppervlak (drijverbanen, figuur 19) en in de diepere lagen (richtingsvaan, figuur 17). Bovengenoemde verschijnselen duiden op een drie-dimensionaal stroombeeld ter plaatse van de proefsleuf, met name tijdens de vloedfase van het getij. Als gevolg hiervan neemt de nauwkeurigheid van de twee-dimensionale (vertikale vlak) aanzandingsberekeningen voor de proefsleuf af. Verlegging van de proefsleuf naar het diepere gedeelte van de geul lijkt echter niet mogelijk in verband met scheepvaarthinder tijdens baggerwerkzaamheden.

Snelheidsvertikalen

Figuren 21...24: snelheidsvertikalen in de langsraaien 2, 2/3, 3 en 3/4 ter plaatse van de proefsleuf.

Als gevolg van traagheidseffekten hebben de snelheidsvertikalen in het vertragingsgebied van de sleuf een duidelijk afwijkende vorm met relatief hoge stroomsnelheden nabij het wateroppervlak en relatief lage stroomsnelheden nabij de bodem. Deze effekten doen zich sterker voor naarmate de stroomsnelheden op de bovenstroomse rand hoger zijn (figuur 23, raai 3, vloed). In het versnellingsgebied van de proefsleuf passen de snelheidsvertikalen zich weer aan, waardoor er relatief volle snelheidsvertikalen kunnen ontstaan, afhankelijk van de taludhelling.

4.3 Situatie na afzinken van tunnelelement 1 (T2)

Stroombeeld

Figuren 25 en 26: gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen.
Figuren 27 en 28: stroomrichtingen volgens drijverbanen.

In en nabij de tunnelsleuf en de toegangsgeul naar het bouwdok (meetpunten B 1, 2, 3, 8, 9, 10 en 11) nemen de stroomsnelheden zowel tijdens de vloed- als de ebfase af, terwijl in het middengedeelte van de tracé-as (meetpunten B 5, 6, 7) de stroomsnelheden enigszins toenemen (maximaal 10%) vergeleken met de TO-situatie (figuren 25 en 6). In raai D nabij het werkeiland (D 1, 2, 3) nemen de stroomsnelheden tijdens de ebfase aanzienlijk toe (ca. 20%) vergeleken met de TO-situatie (figuur 27 en 7).
Ter plaatse van de toegangsgeul naar het bouwdok is er een duidelijk drie-dimensionaal stroombeeld aanwezig. Vooral tijdens de ebfase van het getij wordt de stroming in de diepere lagen nabij de bodem afgebogen in de richting van de geulas (figuur 26), terwijl de stroming nabij het wateroppervlak minder wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de geul (figuur 27). Nabij het werkeiland is een (zwakke) neer aanwezig ter plaatse van de toegangsgeul (figuur 27 en 28).

Snelheidsvertikalen

Figuur 29: snelheidsvertikalen in langsraai 2 ter plaatse van de toegangsgeul naar het bouwdok.

Figuur 30: snelheidsvertikalen in langsraai 11 ter plaatse van de tunnelsleuf.

4.4 Situatie vóór afzinken van tunnelelement 4 (T3)

Stroombeeld

Figuren 31 en 32: gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen.

Figuren 33 en 34: stroomrichtingen volgens drijverbanen.

In deze bouwfase sluit de gebaggerde tunnelsleuf aan op de toegangsgeul naar het bouwdok van de tunnelelementen. Het diepe gedeelte van de tunnelsleuf is over een lengte van ca. 500 m aanwezig. Vooral tijdens de vloedfase van het getij wordt dit gedeelte van de tunnelsleuf scheef aangestroomd. De maximale afwijking bedraagt een hoek van ca. 20°. Er zijn geen duidelijke verschillen in de richting van de stroomsnelheden nabij de bodem en nabij het wateroppervlak (figuren 31 en 33).
Als gevolg van de aanwezigheid van de tunnelsleuf (grotere waterdiepten) neemt het debiet in het middengedeelte van de tracé-as, met name tijdens de vloedstroom enigszins toe. Dit blijkt vooral uit de grotere stroomsnelheden (maximaal 10%) ter plaatse van de raaien E en D vergeleken met de TO-situatie, terwijl de stroomsnelheden langs de oevers enigszins afnemen. Tijdens de ebstroom nemen de stroomsnelheden in de meetpunten D 1 en 2 aanzienlijk (ca. 20 %) toe als gevolg van de aanwezigheid van het werkeiland (figuren 31 en 6, 32 en 7).

Ter plaatse van de toegangsgeul naar het bouwdok is het stroombeeld duidelijk drie-dimensionaal met verschillen in de richting van de stroomsnelheden nabij de bodem en het wateroppervlak (figuren 31 en 33), terwijl er neervorming nabij het werkeiland plaatsvindt (figuren 33 en 34).

Figuren 35 en 36: stroomsnelheden en -richtingen ter plaatse van het tunneleind (tunnelelement 3).

Foto's 4 en 5 : stroomrichtingen langs de bodem (volgens kaliumpermanganaatsporen).

Om het stroombeeld rondom de kop van het tunnelelement 3 vast te leggen zijn er stroomsnelheidsmetingen met de mikro-molen en stroomrichtingsmetingen met de richtingsvaan uitgevoerd in 5 vertikalen met 5 meetpunten in elke vertikaal. De meethoogte boven de bodem is aangegeven in de figuren 35 en 36. Tevens is getracht de grootte en de richting van de stroming langs de bodem vast te stellen door het fotograferen van plastic bollen gevuld met water (diameter = 0,02 m, dichtheid = 1030 kg/m^3) tijdens hun beweging langs de bodem. Door het relatief lage soortelijke gewicht van de bollen mag de snelheid van de bollen representatief worden verondersteld voor de lokale stroomsnelheid. De grootte en richting van de bodemsnelheden is weergegeven in de figuren 35 en 36 (rechts onderaan).
Het stroombeeld rondom de kop van het tunnelelement 3 is sterk drie-dimensionaal, zowel tijdens de vloed- als de ebfase van het getij. Naast het afgezonken tunnelelement (meethoogte op 2,5 m en 7,2 m) zijn sterke langsstromen aanwezig met relatief hoge stroomsnelheden van 0,40-0,70 m/s tijdens de vloedstroom en 0,30-0,50 m/s tijdens de ebstroom. Dit blijkt ook duidelijk uit de stroombeelden volgens de kaliumpermanganaatsporen (foto's 4 en 5). Boven het afgezonken tunnelelement (meethoogte op 11,8 m; 19,8 m en 29,2 m) zijn de verschillen in de richting van de stroming gering.
Ook uit de beweging van de bollen langs de bodem blijkt dat er langsstromen naast het tunnelelement aanwezig zijn met bodemsnelheden, variërend van 0,10 - 0,30 m/s, met name tijdens de vloedfase van het getij.

Snelheidsvertikalen

Figuren 37 en 38: snelheidsvertikalen in langsraai 8 ter plaatse van de tunnelsleuf.

Figuren 39 en 40: snelheidsvertikalen in langsraai 9 ter plaatse van de tunnelsleuf.

4.5 Situatie na afzinken van tunnelelement 4 (T4)

Stroombeeld

Figuren 41 en 42: gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen.
Figuren 43 en 44: stroomrichtingen volgens drijverbanen.

Tijdens de vloedfase van het getij is het stroombeeld vrijwel gelijk aan het stroombeeld vóór het afzinken van tunnelelement 4. Alleen ter plaatse van het tunnelelement (B 9, 10) en benedenstrooms daarvan (D 9, 10) zijn er enigszins lagere stroomsnelheden, terwijl ook in het middengedeelte van raai D (D 5, 6, 7) lagere stroomsnelheden optreden (figuren 41 en 31). Tijdens de ebfase van het getij zijn er nauwelijks verschillen waarneembaar vergeleken met de situatie vóór het afzinken van tunnelelement 4 (figuren 42 en 32).

Figuren 45 en 46: stroomsnelheden en -richtingen ter plaatse van het tunneleind (tunnelelement 4).
Foto's 6 en 7 : stroomrichtingen langs de bodem (volgens kaliumpermanganaatsporen).

Het stroombeeld rondom de kop van tunnelelement 4 is vergelijkbaar met het stroombeeld rondom de kop van tunnelelement 3. Naast het afgezonken tunnelelement zijn langsstromen aanwezig met stroomsnelheden, variërend van 0,3 - 0,7 m/s tijdens de vloedstroom en 0,2 - 0,5 m/s tijdens de ebstroom. De aanwezigheid van langsstromen blijkt eveneens uit de stroombeelden volgens de kaliumpermanganaatsporen en de beweging van de bollen langs de bodem.

Snelheidsvertikalen

Figuren 47 en 48: snelheidsvertikalen in langsraai 7 ter plaatse van de tunnelsleuf.
Figuren 49 en 50: snelheidsvertikalen in langsraai 8 ter plaatse van de tunnelsleuf.

4.6 Situatie na afzinken van tunnelelement 7 (T5)

Figuren 51 en 52: gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen.
Figuren 53 en 54: stroomrichtingen volgens drijverbanen.

In deze situatie is de toegangsgeul naar het bouwdok gedeeltelijk weggebaggerd. Tijdens de vloedstroom is het debiet in het middengedeelte van de geul enigszins toegenomen vergeleken met de TO-situatie. Dit blijkt vooral uit de grotere stroomsnelheden in de meetpunten E 4, 5, 6, 7 en 8, terwijl de stroomsnelheden in de meetpunten E 1, 2, 3, 9 en 10 zijn afgenomen (figuren 51 en 6).
Tijdens de ebstroom nemen de stroomsnelheden nabij het werkeiland (D 1, 2, 3) toe vergeleken met de TO-situatie (figuren 52 en 7).

Figuren 55 en 56: stroomsnelheden en -richtingen ter plaatse van het tunneleind (tunnelelement 7).
Foto's 8 en 9 : stroomrichtingen langs de bodem (volgens kaliumpermanganaatsporen).

Snelheidsvertikalen

Figuren 57 en 58: snelheidsvertikalen in langsraai 4 ter plaatse van de tunnelsleuf.
Figuren 59 en 60: snelheidsvertikalen in langsraai 5 ter plaatse van de tunnelsleuf.

4.7 Situatie na afzinken van tunnelelement 10 (T6)

Stroombeeld

Figuren 61 en 62: gemiddelde stroomsnelheden en -richtingen.
Figuren 63 en 64: stroomrichtingen volgens drijverbanen.

In deze situatie sluit de tunnelsleuf volledig aan op het werkeiland, terwijl het gedeelte van de tunnelsleuf ter plaatse van de noordelijke oever weer is aangevuld met zand.
Opmerkelijk zijn de relatief geringe stroomsnelheden tijdens de vloedstroom langs het werkeiland (E 1, 2, 3) en de oever van Zuid-Beveland (B 1, 2, 3) vergeleken met de TO-situatie (figuren 61 en 6). In het middengedeelte van de geul zijn er enigszins hogere stroomsnelheden. Tijdens de ebstroom treden er hogere stroomsnelheden op langs het werkeiland (D 1, 2, 3) vergeleken met de TO-situatie (figuren 62 en 7).

Figuren 65 en 66: stroomsnelheden en -richtingen ter plaatse van het tunneleind (tunnelelement 10).

Foto's 10 en 11 : stroomrichtingen langs de bodem (volgens kaliumpermanganaat-sporen).

Snelheidsvertikalen

Figuur 67 : snelheidsvertikalen in langsraai 2 ter plaatse van de tunnel-sleuf.

Figuren 68 en 69: snelheidsvertikalen in langsraai 5 ter plaatse van de tunnel-sleuf.

5. Ontgrondingsonderzoek

Om een indruk te krijgen van de ontgronding rondom de kop van een tunnelelement, afgezonken in het middengedeelte van de geul, zijn er ontgrondingsproeven uitgevoerd tijdens de situatie na het afzinken van tunnelelement 4 (T4) bij stromingsomstandigheden overeenkomend met een normaal springtij (getijfaktor 1,18). Het bodemmateriaal in het model bestond uit polystyreenkorrels met een diameter van ca. 1280 μm, een dichtheid van ca. 1058 kg/m^3 en een kritieke stroomsnelheid van 0,1 m/s. Foto's 12 en 13 geven een (kwalitatief) beeld van het drie-dimensionale ontgrondingspatroon rondom de kop van het tunnelelement tijdens de vloed- en de ebfase van het getij. Aan weerszijden van het tunnelelement treedt ontgronding op als gevolg van het ontstaan van langsstromen nabij de bodem waarin stroomsnelheden variërend van 0,3 - 0,7 m/s tijdens de vloedstroom en 0,2 - 0,5 m/s tijdens de ebstroom zijn gemeten. Deze waarden zijn aanzienlijk groter dan de (kritieke) stroomsnelheden die nodig zijn om het in de natuur aanwezige fijne zand van 150-200 μm in beweging te brengen, terwijl ook de relatief grote turbulentie-intensiteit de lokale transportkapaciteit doet toenemen. Ook aan de benedenstroomse zijde van het afgezonken tunnelelement kan een ontgrondingskuil ontstaan door de aanval van relatief grote wervels die worden gevormd in het loslaatgebied achter het tunnelelement (foto 12).
Bij de situatie na het afzinken van tunnelelement 7 (T5) is eveneens een ontgrondingsproef uitgevoerd (alleen vloedstroom). Het debiet was zodanig dat er in de sleuf ter plaatse van het tunnelelement een gemiddelde stroomsnelheid van ca. 0,15 m/s optrad. Het bodemmateriaal (polystyreen) was aangebracht in 4 lagen van 0,01 m dikte met per laag een verschillende kleur (wit, rood, blauw en wit). Het zichtbaar worden van de rode laag betekent dus een ontgronding van 0,01 m, enz. Aan weerszijden van het tunnelelement was een laag van fijn grind aangebracht ter afdekking van een spleet met een hoogte van 0,01 m aanwezig tussen de onderkant van het tunnelelement en de bodem. De laag grind strekte zich uit tot aan de positie van de vijzels (15 meter vanaf de kop van de tunnel). Langs het tunnelgedeelte tussen de vijzels en de kop van het tunnelelement bleef de spleet onafgedekt.
Uit foto 14 blijkt dat er aan de bovenstroomse zijde en naast het tunnelelement ontgronding optreedt als gevol van langs- en dwarsstromen. Ook aan de benedenstroomse zijde van het tunnelelement wordt materiaal geërodeerd als gevolg van wervelaanvallen die in het loslaatgebied van de stroming ontstaan. Het verloop van de ontgronding (diepste punt) als funktie van de tijd is weergegeven in figuur 70. Hieruit blijkt dat, vooral in de beginfase, het ontgrondingsproces

aanzienlijk (faktor 10) sneller voortschrijdt dan in de daaropvolgende fasen. Na ca. 500 sek. is, lokaal, de volledige laag polystyreenkorrels verdwenen. In het model werd het geërodeerde materiaal voor een deel aan de benedenstroomse zijde van het tunnelelement afgezet (bultvorming). In de natuur zal dit niet optreden, omdat het fijne zand in suspensie zal worden afgevoerd uit de sleuf. Als gevolg van de aanwezigheid van een getijstroming zal er aan weerszijden en aan de kop van het tunnelelement ontgronding optreden.

Volgens empirisch onderzoek kan de tijdschaal van het ontgrondingsproces worden weergegeven door (Waterloopkundig Laboratorium, verslag modelonderzoek M 648/M 863):

$$n_t = \frac{(n_\Delta)^{1,7} \; (n_h)^2}{(n_{\alpha\bar{u}-\bar{u}_{kr}})^{4,3}} \qquad (5.1)$$

waarin:

$n_\Delta = \dfrac{(\rho_s - \rho)_{natuur}}{(\rho_s - \rho)_{model}}$ = schaalfaktor voor de relatieve dichtheid van het bodemmateriaal

$n_h = \dfrac{h_{natuur}}{h_{model}}$ = schaalfaktor voor de waterdiepte (= 100)

$n_{\alpha\bar{u}-\bar{u}_{kr}} = \dfrac{(\alpha\bar{u} - \bar{u}_{kr})_{natuur}}{(\alpha\bar{u} - \bar{u}_{kr})_{model}}$ = schaalfaktor voor transportparameter

ρ_s	= dichtheid van het bodemmateriaal	(kg/m^3)
ρ	= dichtheid van het water	(kg/m^3)
h	= waterdiepte	(m)
$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
$\bar{u}_{kr}$	= gemiddelde stroomsnelheid bij begin van beweging	(m/s)
α	= geometriefaktor	

Op grond van ervaring met ontgrondingsonderzoek in verschillende stromingsomstandigheden is een α-faktor verondersteld van 3 à 5.

In het model en de natuur gelden de volgende stromingsomstandigheden:

	natuur	model
bodem-materiaal	zand d_{50} = 170 μm ρ_s = 2650 kg/m^3 $\bar{u}_{kr}$ = 0,2 m/s	polystyreen d_{50} = 1280 μm ρ_s = 1058 kg/m^3 $\bar{u}_{kr}$ = 0,1 m/s
stroming in de sleuf	vloed: $\bar{u}$ = 0,70 m/s (2 uur) $\bar{u}$ = 0,45 m/s (2 uur) eb : $\bar{u}$ = 0,55 m/s (4 uur)	$\bar{u}$ = 0,15 m/s

De modeltijd om 1 dag (24 uur) in de natuur te reproduceren bedraagt:

$$t_{model} = 2 \left(\sum_{1}^{m} \frac{\Delta t_{eb}}{n_{t,eb}} + \sum_{1}^{m} \frac{\Delta t_{vloed}}{n_{t,vloed}} \right) \qquad (5.2)$$

waarin:

Δt_{eb} = geschematiseerde tijdsduur van de ebperiode (4 uur)
Δt_{vloed} = geschematiseerde tijdsduur van de vloedperiode (2 x 2 uur)
$n_{t,eb}$ = tijdschaal voor de ebperiode volgens vergelijking (5.1)
$n_{t,vloed}$ = tijdschaal voor de vloedperiode volgens vergelijking (5.1)
m = aantal tijdvakken, waarin vloed- en ebperiode zijn geschematiseerd.

Uitgaande van bovengenoemde gegevens en α = 3 à 5 volgt een modeltijd om 1 dag te reproduceren van ca. 10 à 13 sec. Volgens de tijd-ontgrondingsgrafiek (figuur 70) betekent dit een lokale ontgronding van ca. 0,01 m, hetgeen overeenkomt met een ontgronding in de natuur van ca. 1 m in 1 dag (24 uur). Na 30 dagen (ca. 400 sec. in het model) bedraagt de lokale ontgronding in de natuur ca. 4 m.
Met nadruk wordt er op gewezen dat deze zeer globale berekeningen slechts een orde van grootte aangeven, aangezien de geometriefaktor α moest worden geschat. De juiste waarde van deze α-faktor en nauwkeuriger voorspellingen voor ontgrondingen kunnen alleen door gedetailleerd modelonderzoek worden vastgesteld.

Samenvattend kan worden gesteld dat (indien geen beschermende maatregelen worden genomen):

- als gevolg van de getijstromen aan weerszijden en aan de kop van het tunnelelement ontgronding zal plaatsvinden,

- na 1 dag (24 uur) een ontgrondingsdiepte in de orde van 1 m kan optreden, oplopend tot ca. 4 m na 30 dagen,
- door ondergraving van de vijzels de stabiliteit van het tunnelelement in gevaar kan komen.

Literatuur

1 Waterloopkundig Laboratorium
Systematisch onderzoek naar twee- en drie-dimensionale ontgrondingen, verslag modelonderzoek M 648/M 863, deel I, II en III, april 1972

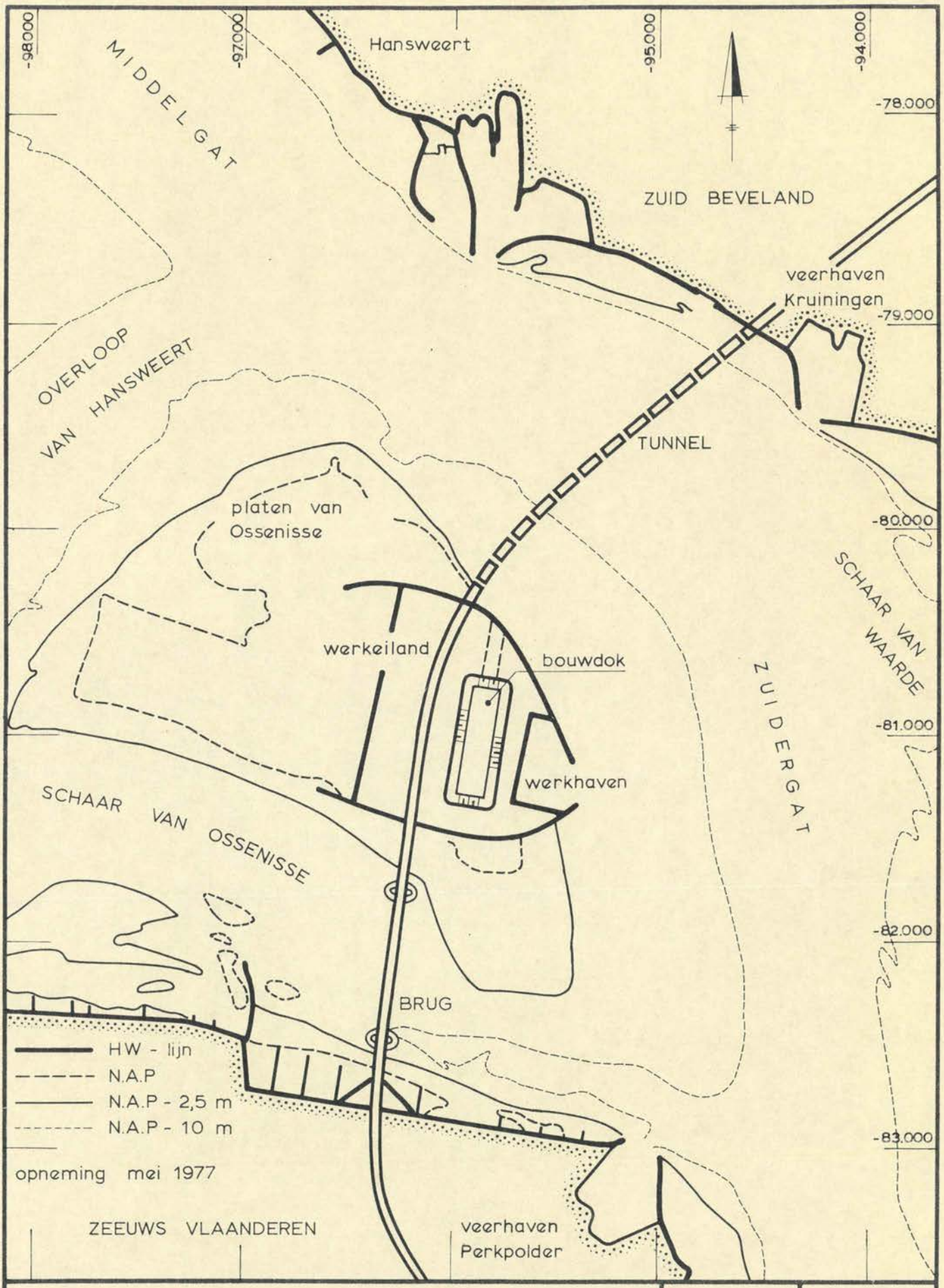
meet-station	datum	R.W.S. tekening	getij-faktor	maximum vloed (1 uur voor H.W.)				maximum eb (3 uur na H.W.)			
				gemiddelde stroom-richting *	gemiddelde stroom-snelheid (m/s)	wind-snelheid (m/s) **	wind-richting	gemiddelde stroom-richting *	gemiddelde stroom-snelheid	wind-snelheid (m/s) **	wind-richting
A I	12-6-1979	A4.79709	1,18	90°	1,65	1 (0)	ZW	240°	0,35	2 (1)	W
A II	12-6-1979	A4.79710	1,18	80°	1,60	1 (0)	ZW	260°	0,75	2 (1)	W
A III	12-6-1979	A4.79711	1,18	90°	1,50	1 (0)	ZW	270°	0,90	2 (1)	W
A IV	12-6-1979	A4.79712	1,18	120°	0,70	1 (0)	ZW	280°	1,0	2 (1)	W
A V	12-6-1979	A4.79713	1,18	140°	0,80	1 (0)	ZW	320°	0,9	2 (1)	W
A VI	12-6-1979	A4.79714	1,18	130°	1,0	1 (0)	ZW	320°	1,10	2 (1)	W
A VII	12-6-1979	A4.79715	1,18	130°	1,0	1 (0)	ZW	80°	0,30	2 (1)	W
B I	28-3-1979	A4.79753	1,30	120°	0,45	11 (5)	ZW	340°	1,10	6 (3)	Z
B II	15-5-1979	A4.79758	1,15	150°	1,60	1 (0)	ZW	330°	1,15	2 (1)	ZO
B III	28-3-1979	A4.79754	1,30	130°	1,65	11 (5)	ZW	330°	1,30	6 (3)	Z
B IV	15-5-1979	A4.79759	1,15	140°	2,0	1 (0)	ZW	320°	1,45	2 (1)	ZO
B V	15-5-1979	A4.79760	1,15	130°	1,65	1 (0)	ZW	310°	1,30	2 (1)	ZO
B VI	15-5-1979	A4.79761	1,15	130°	1,30	1 (0)	ZW	310°	1,05	2 (1)	ZO
C I	30-5-1980	A4.81375	1,12	120°	0,25	6 (3)	NW	5°	0,90	5 (3)	NW
C II	30-5-1980	A4.81376	1,12	130°	0,50	6 (3)	NW	350°	1,10	5 (3)	NW
C III	30-5-1980	A4.81377	1,12	160°	1,20	6 (3)	NW	345°	1,10	5 (3)	NW
C IV	30-5-1980	A4.81378	1,12	160°	1,35	6 (3)	NW	345°	0,75	5 (3)	NW
C V	30-5-1980	A4.81379	1,12	155°	1,25	6 (3)	NW	335°	0,65	5 (3)	NW
C VI	30-5-1980	A4.81380	1,12	145°	1,35	6 (3)	NW	320°	0,80	5 (3)	NW
C VII	30-5-1980	A4.81381	1,12	135°	1,30	6 (3)	NW	315°	0,95	5 (3)	NW

Opmerkingen:

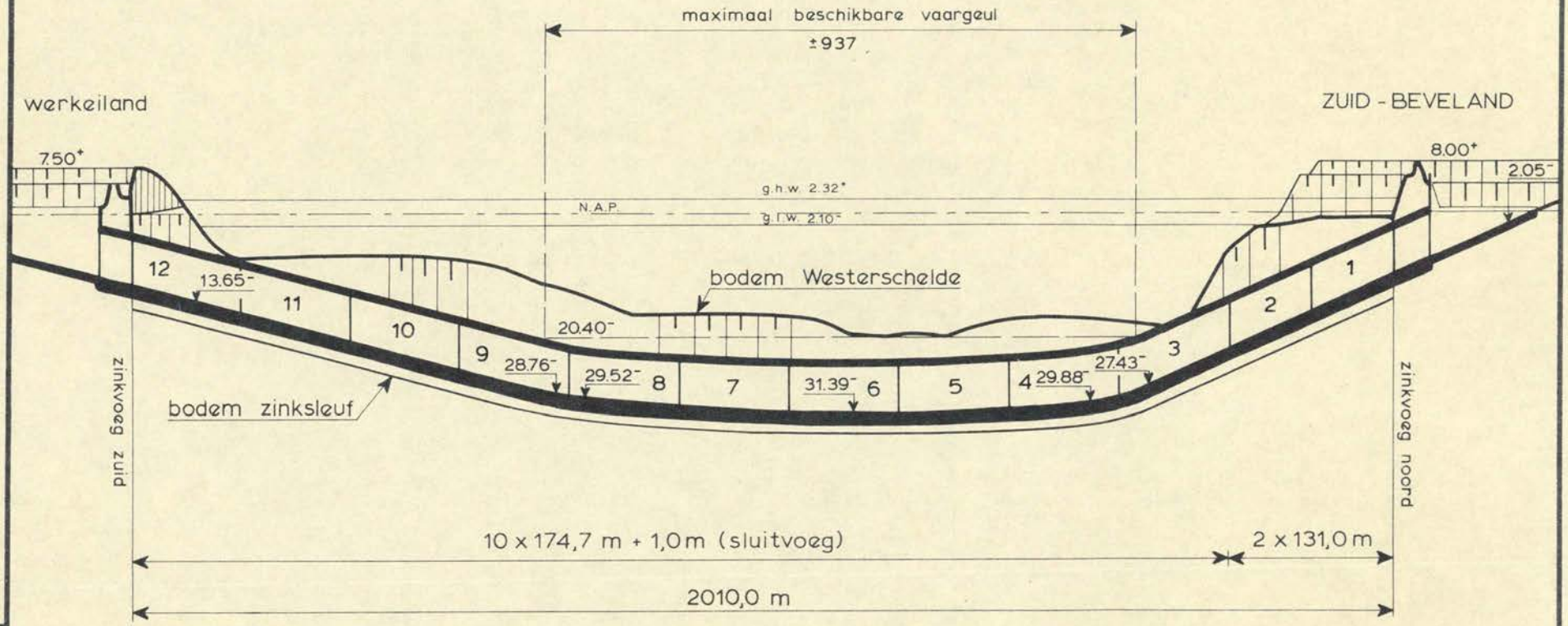
* De gemiddelde stroomrichting is aangegeven in sex. graden t.o.v. het kaartnoorden

** De windsnelheid is gegeven in m/s en de schaal van Beaufort

Tabel 1 Natuurmetingen in de Westerschelde



SITUATIE VASTE OEVERVERBINDING WESTERSCHELDE		
	SCHAAL 1:25.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 1



het zinkgedeelte van de tunnel bestaat uit 12 elementen, die van noord naar zuid zijn genummerd. element 11 zal als laatste worden afgezonken, waarbij de sluitvoeg tussen de elementen 11 en 12 komt te liggen.

maten en peilen in meters

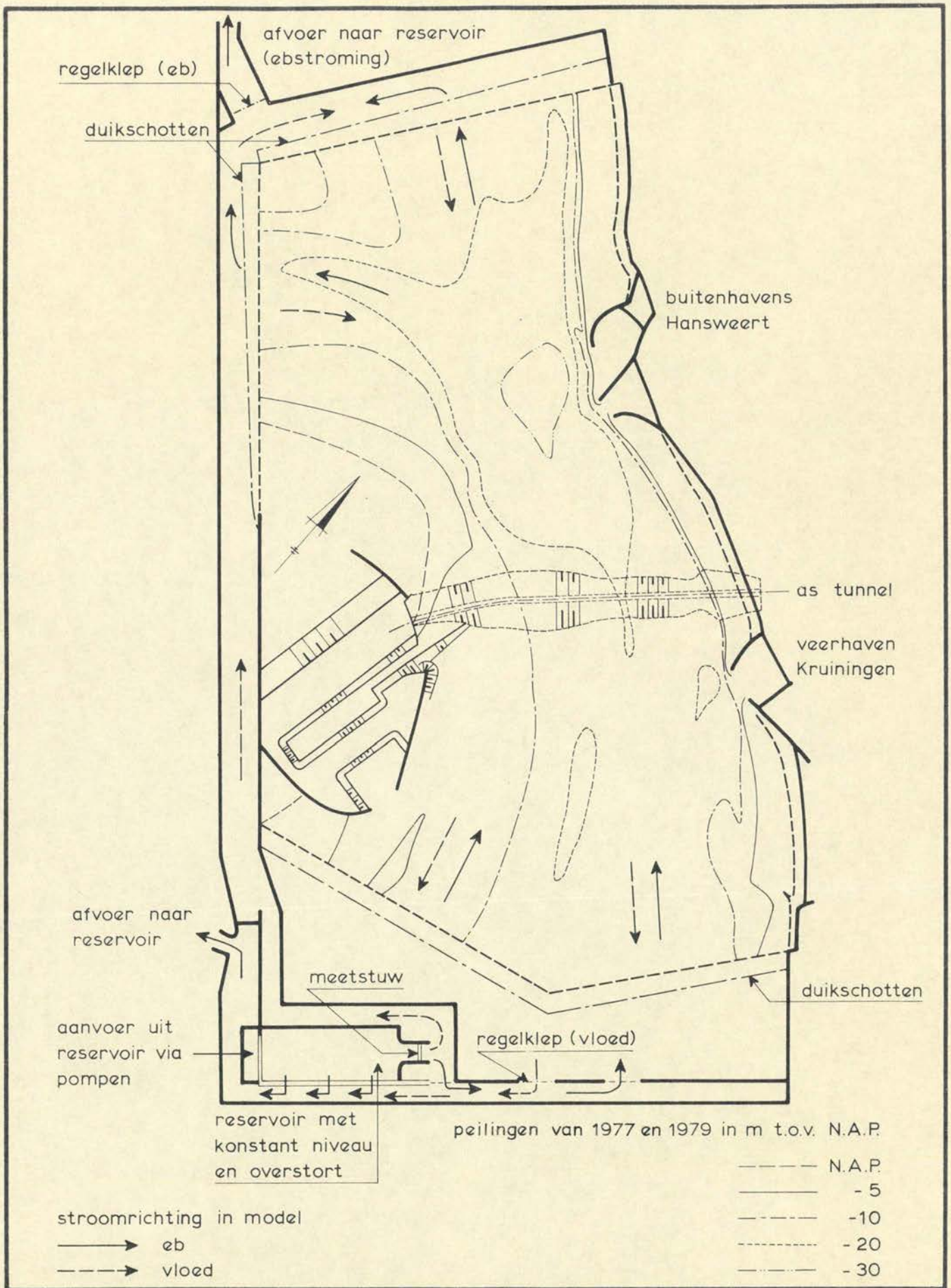
LANGSDOORSNEDE WESTERSCHELDETUNNEL

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

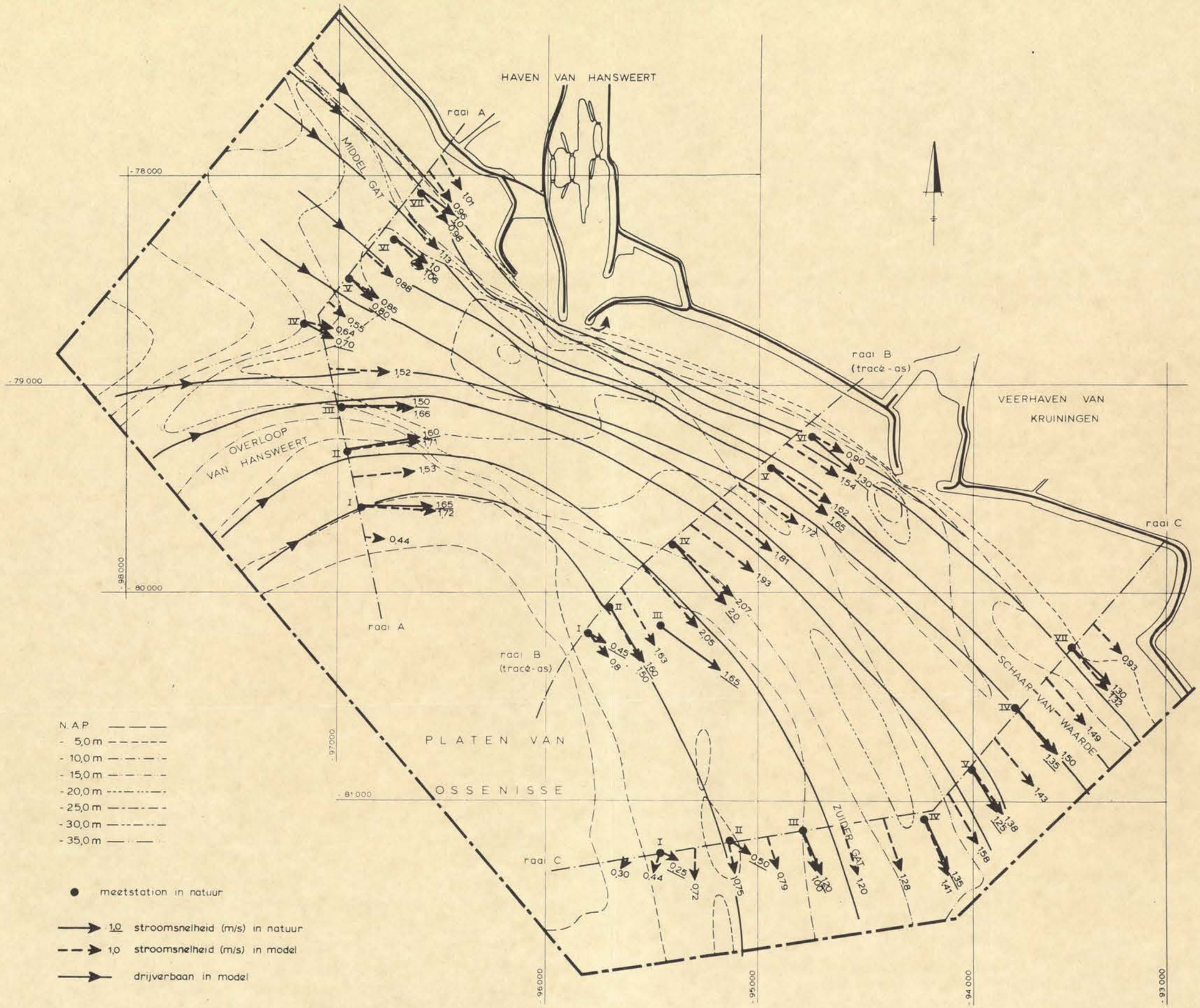
M 1734

schaal: hor. 1:10.000
vert. 1:1000

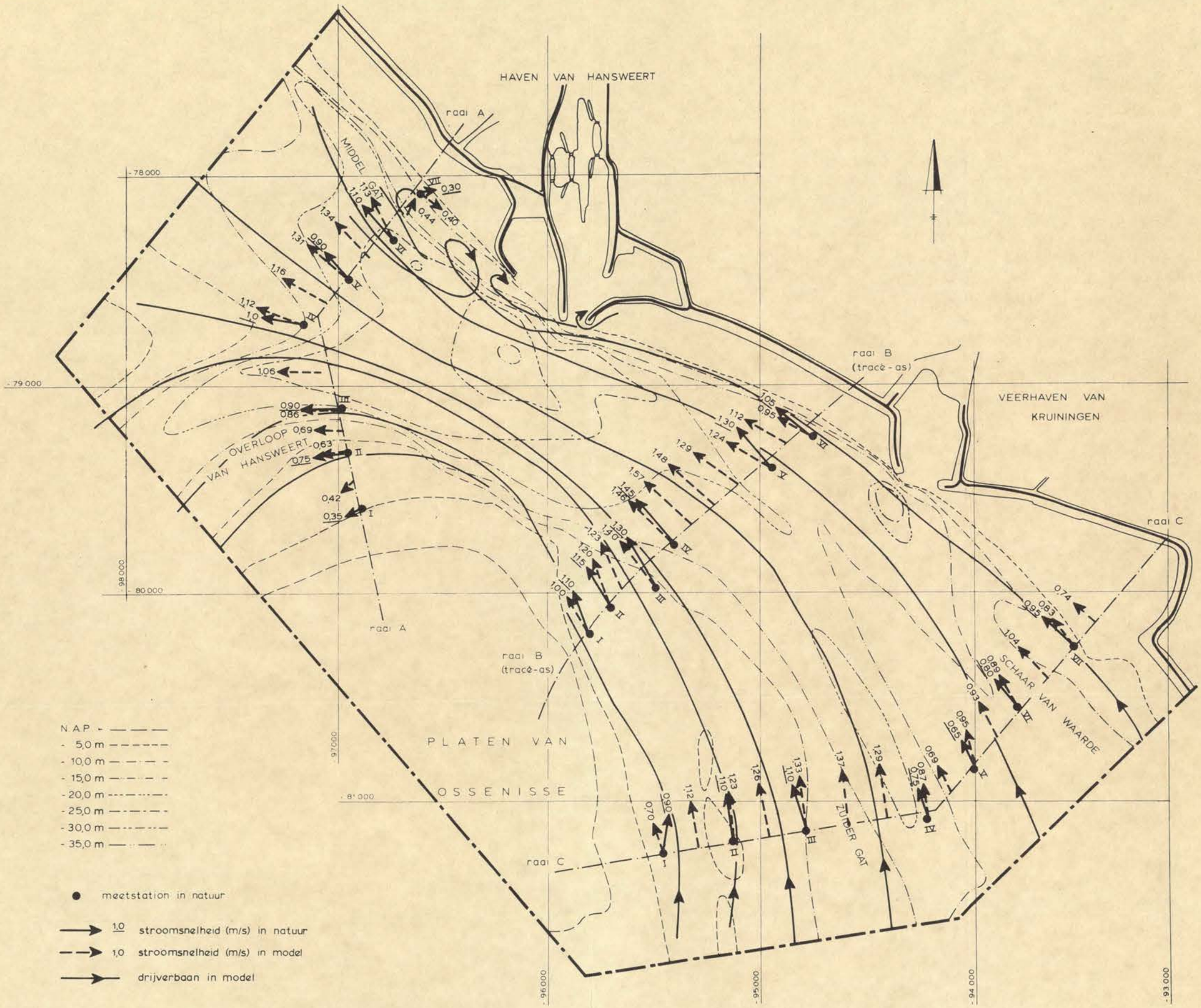
FIG. 2



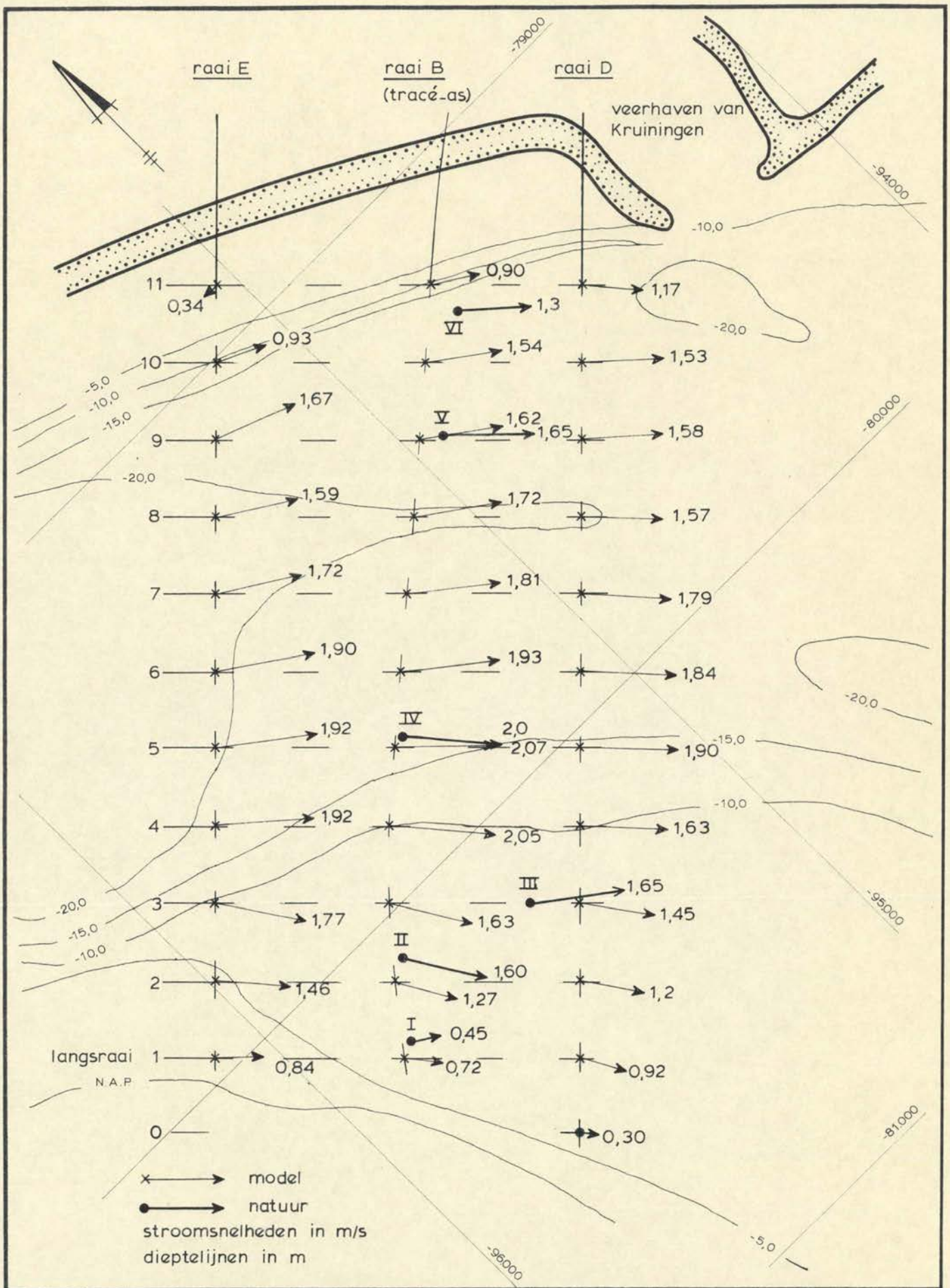
OVERZICHT MODEL	SCHAAL 1 : 300	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 3



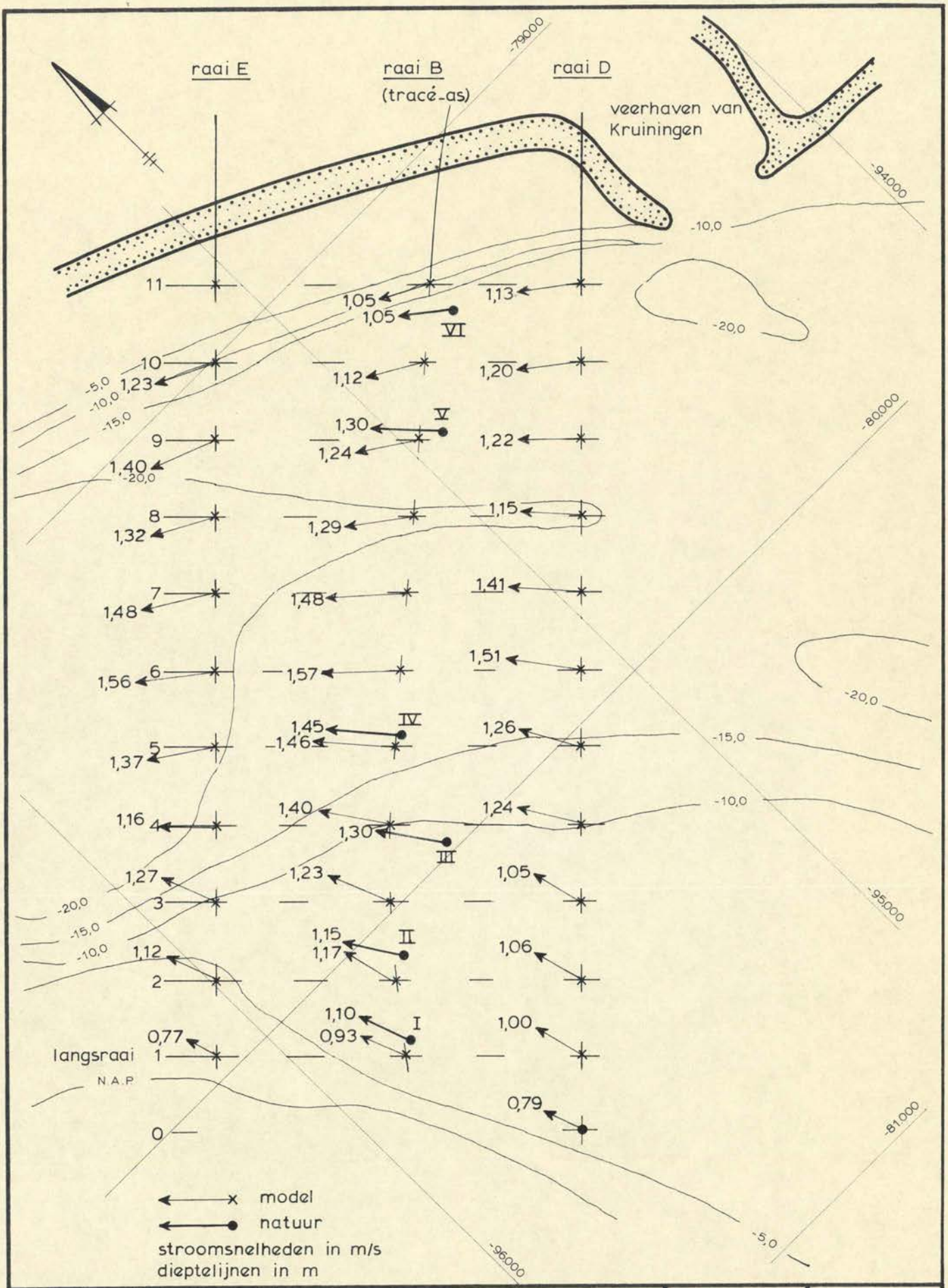
STROOMBEELD		MAX. VLOED
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 4



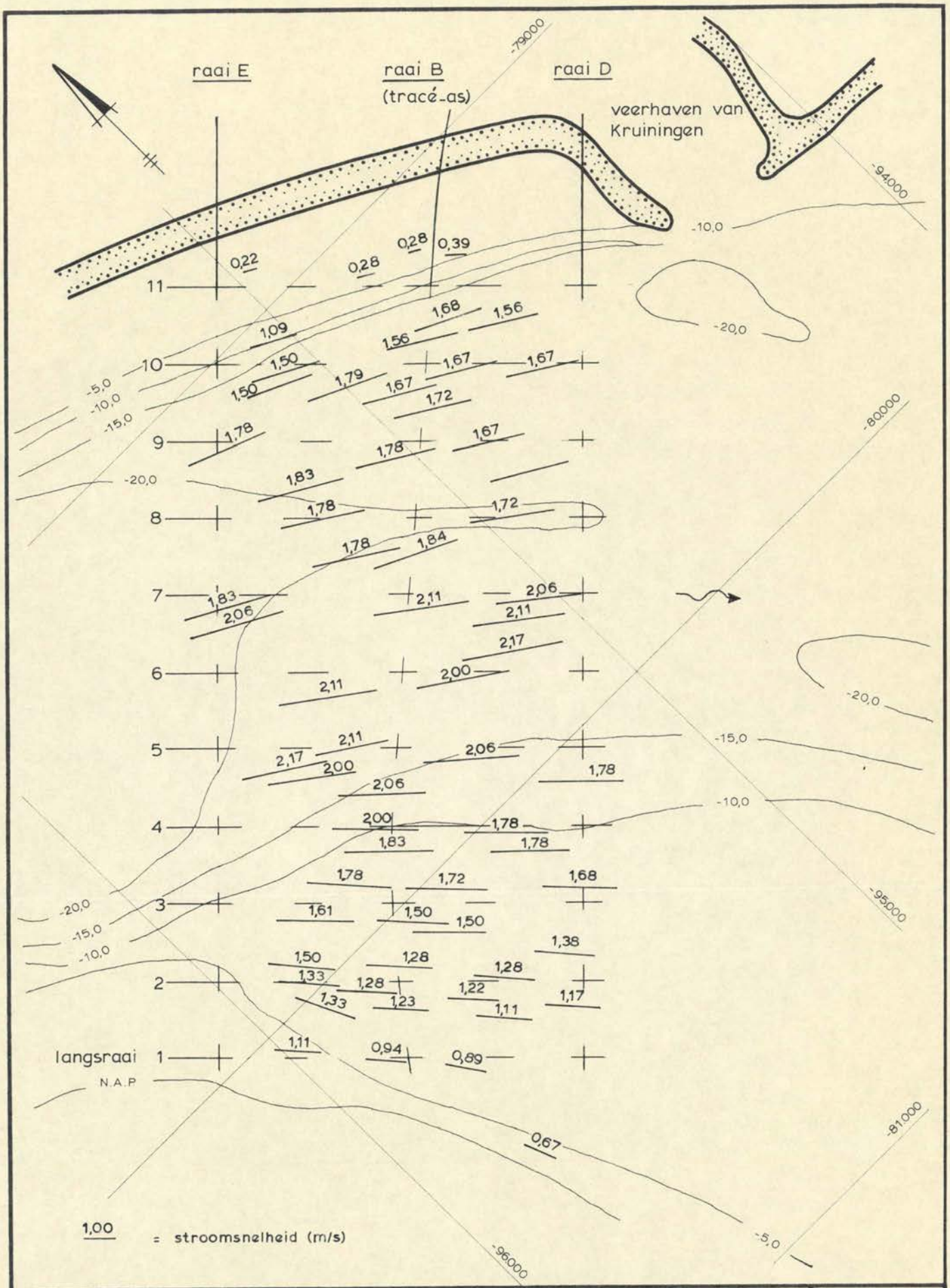
STROOMBEELD		MAX. EB
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 5



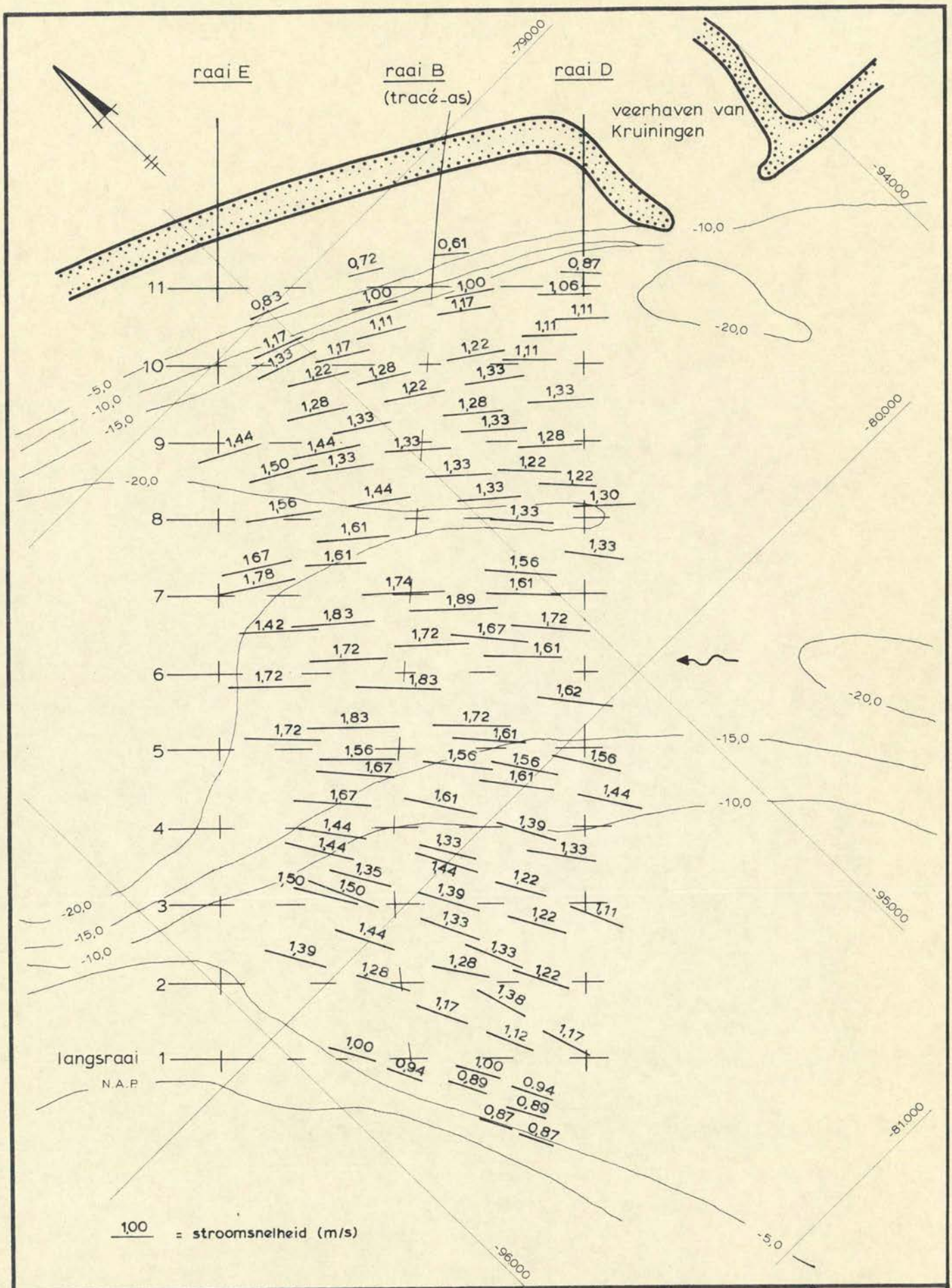
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	TO	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 6



GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	TO	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 7

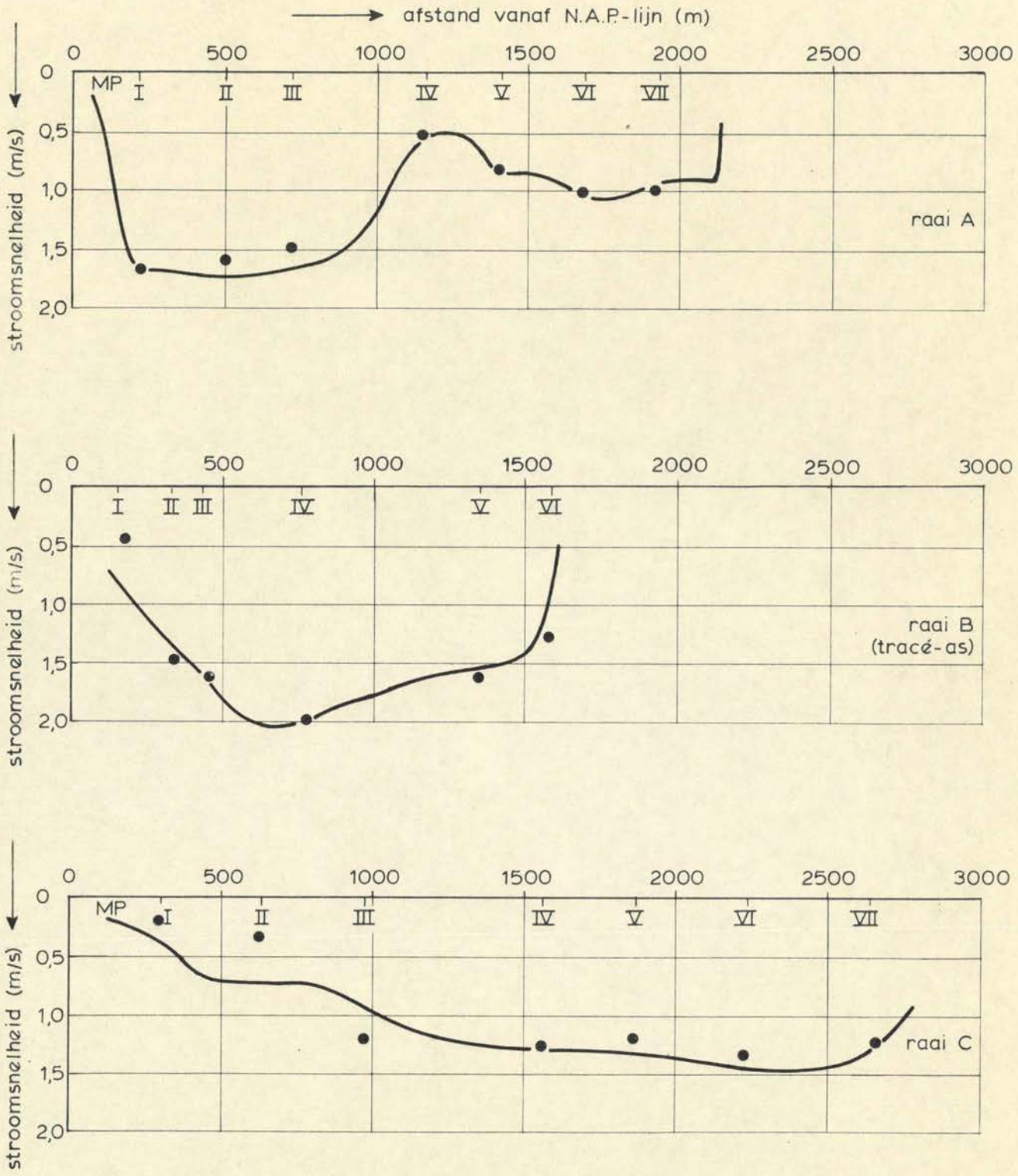


STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	TO	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 8



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	TO	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 9

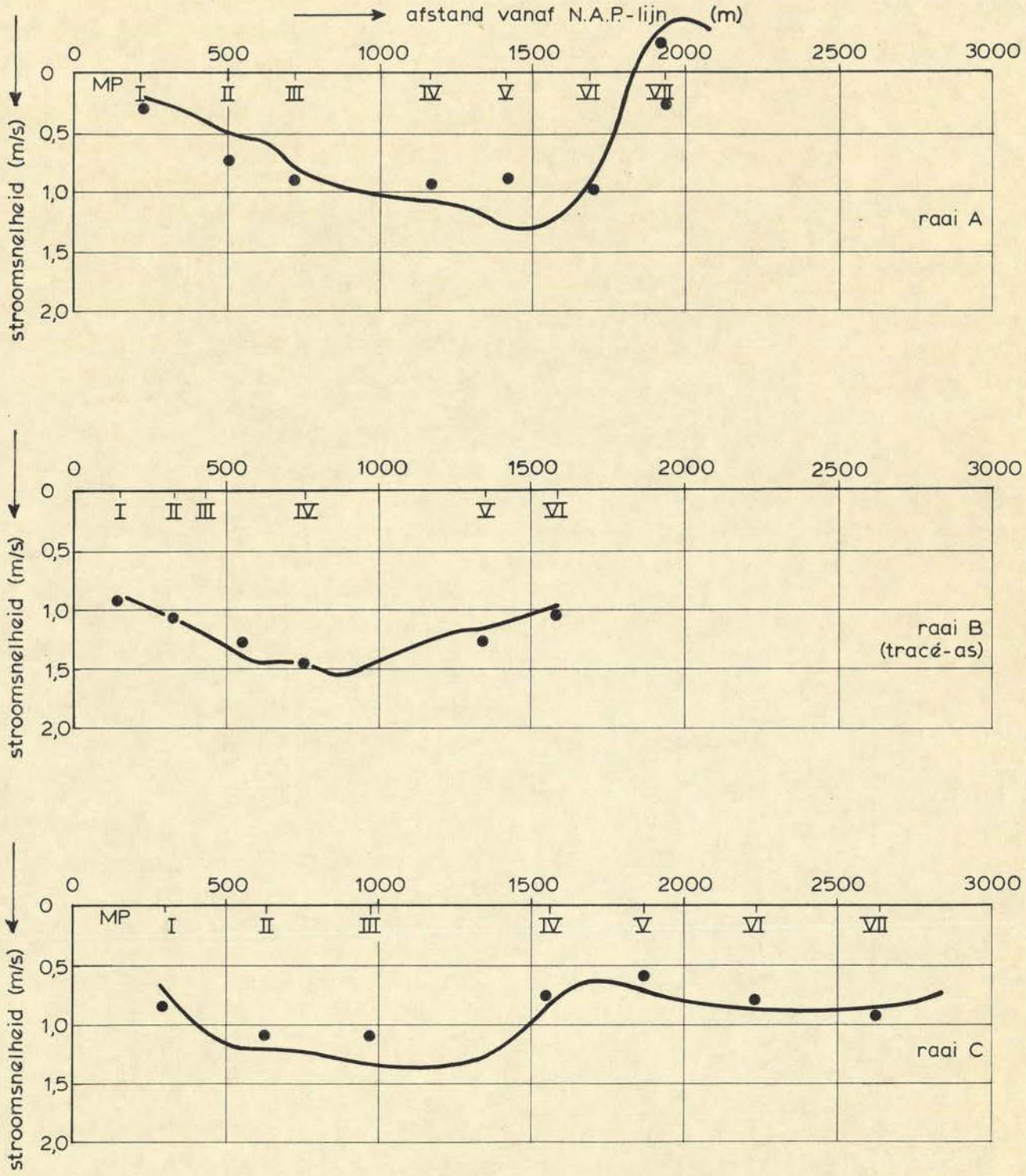
PLATEN VAN OSSENISSE ZUID-BEVELAND



gemiddelde stroomsnelheid (op 0,35 h) in het model

● gemiddelde stroomsnelheid in de natuur

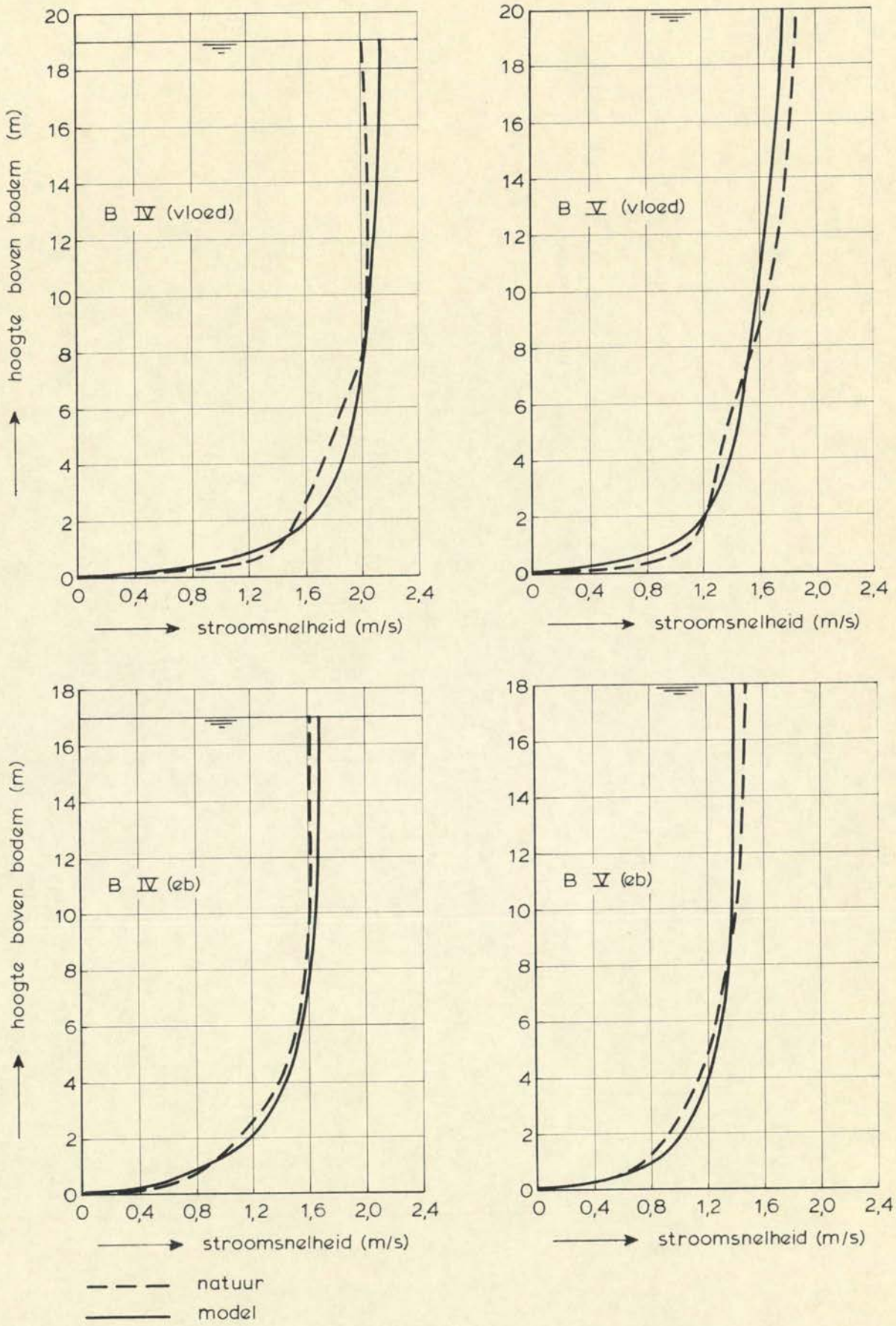
STROOMSNELHEIDSVERDELINGEN IN IJKRAAIEN	TO	MAX. VLOED
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 10



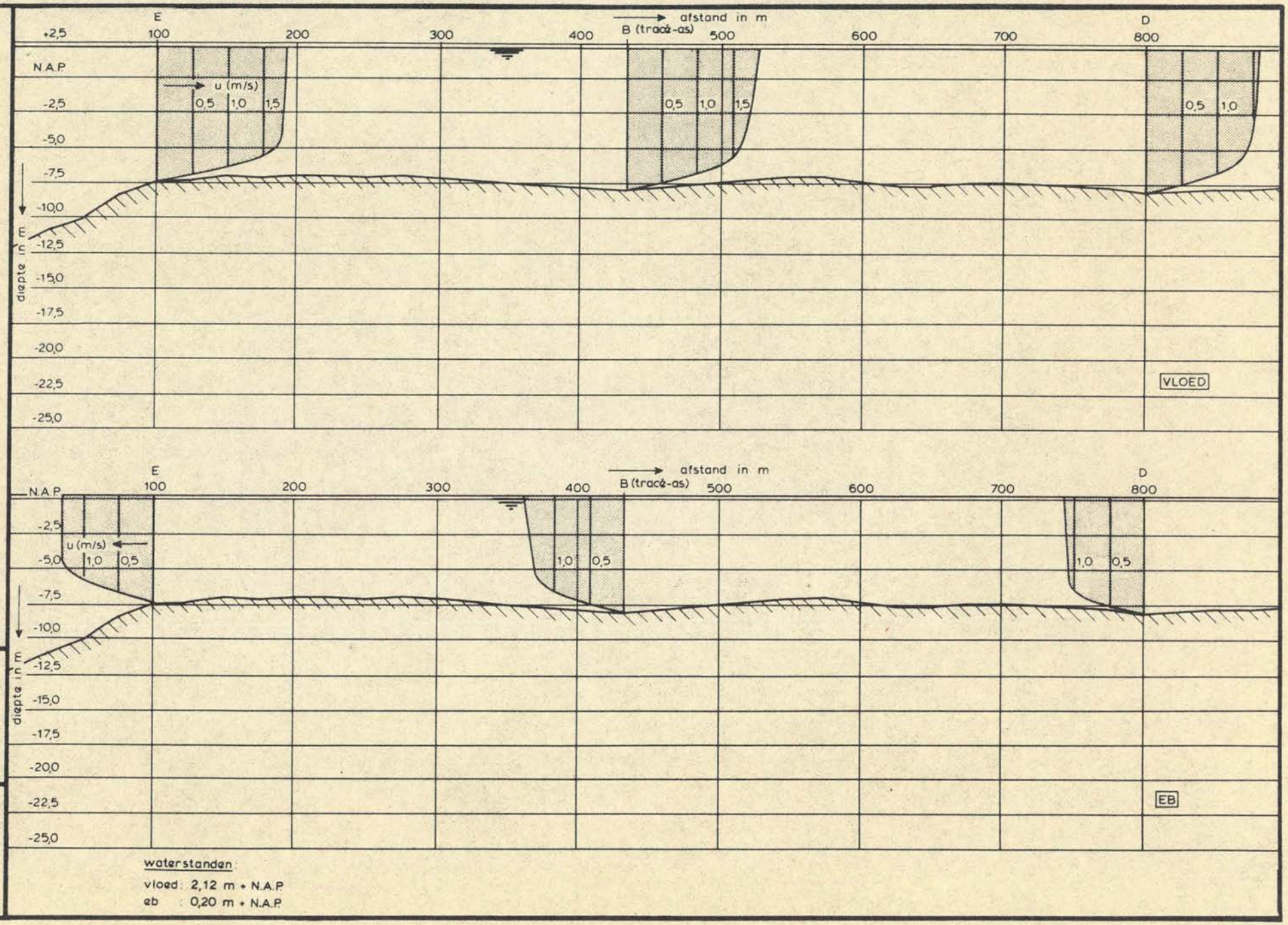
gemiddelde stroomsnelheid (op 0,35 h) in het model

● gemiddelde stroomsnelheid in de natuur

STROOMSNELHEIDSVERDELINGEN IN IJKRAAIEN	TO	MAX. EB
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 11



STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN TRACÉ-AS	TO	MAX. VLOED/ MAX. EB
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 12



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

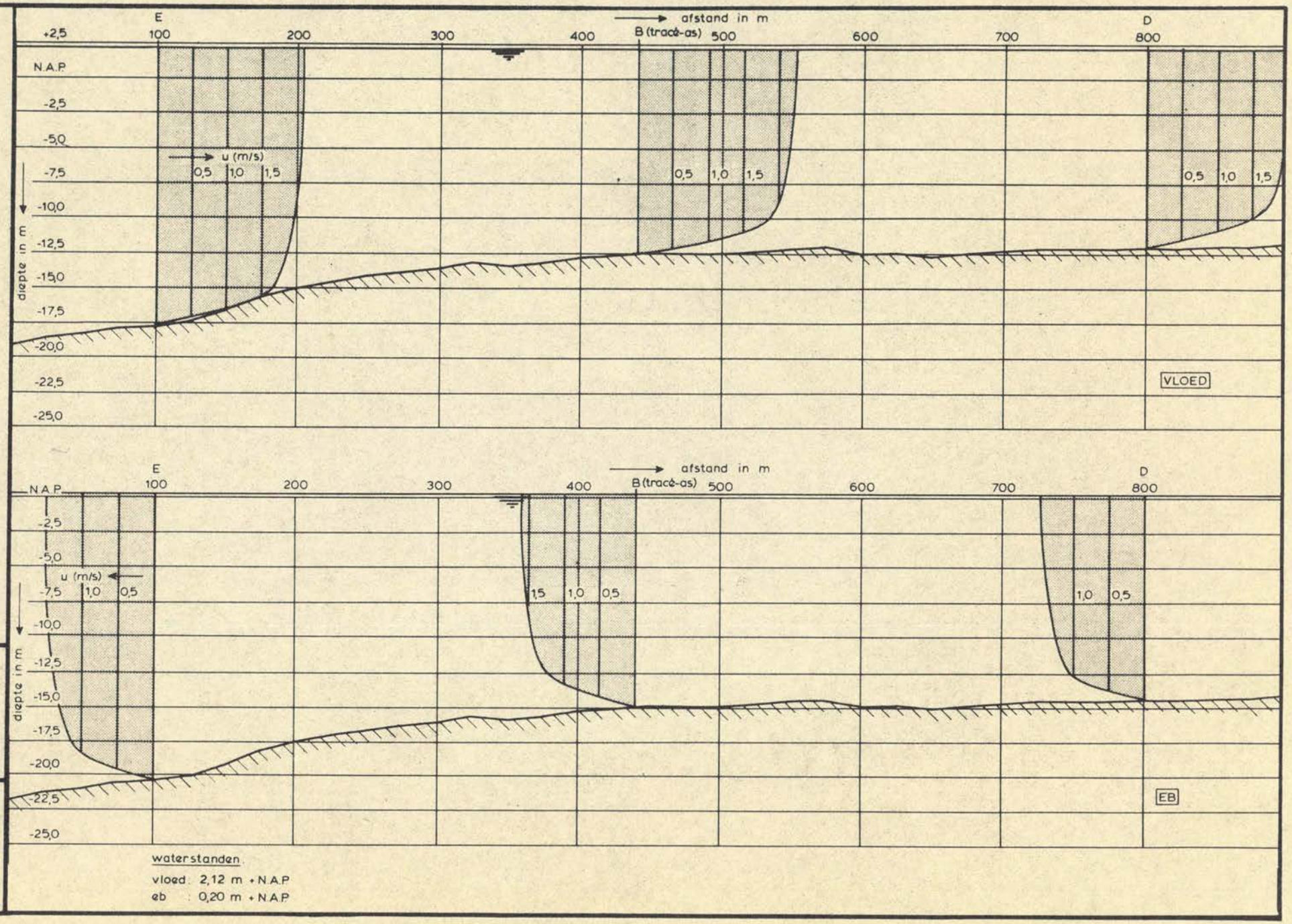
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 3

TO

MAX. VLOED/ MAX. EB

M 1734

FIG. 13



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

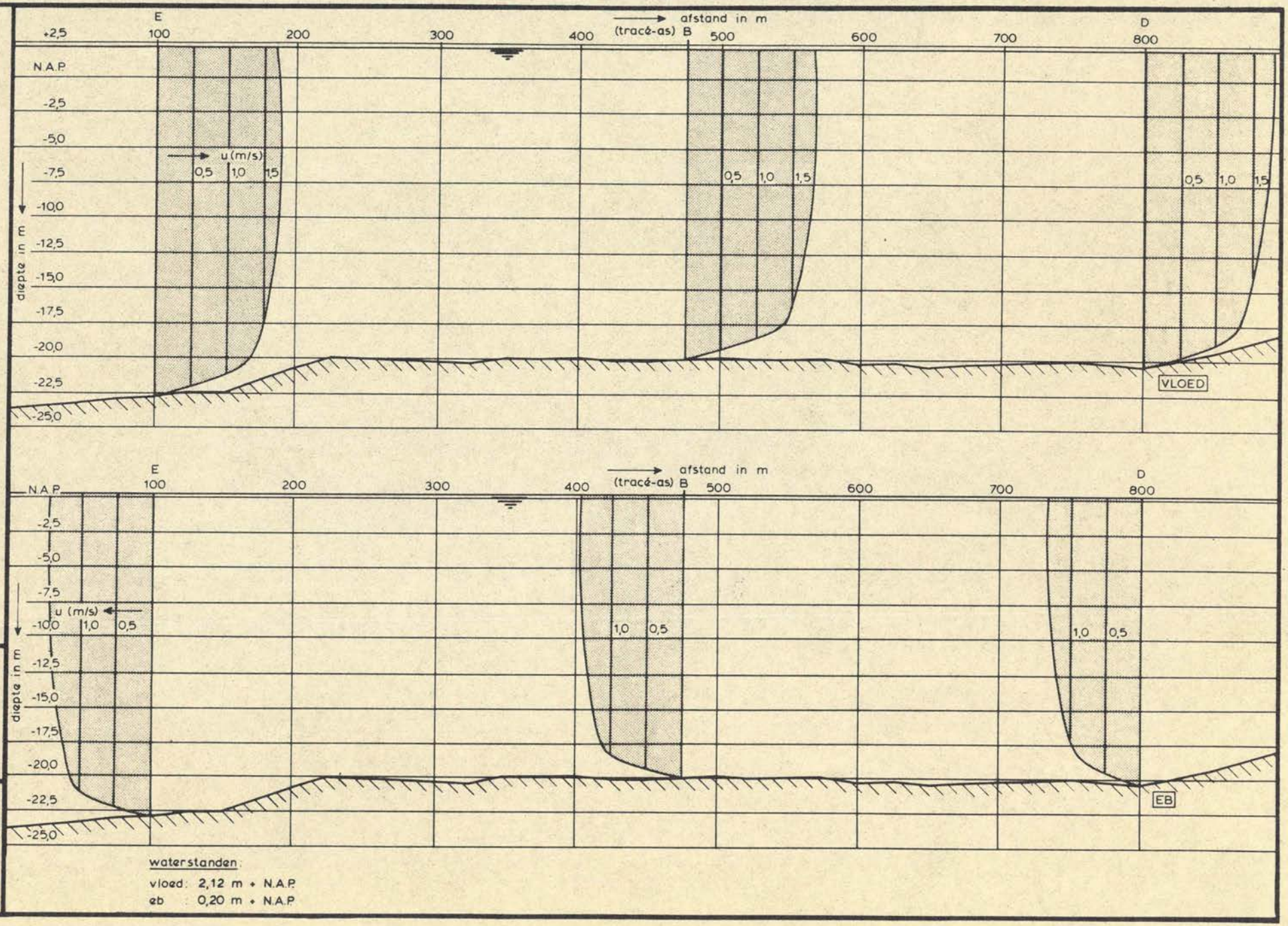
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 5

TO

MAX. VLOED/ MAX. EB

M 1734

FIG. 14



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

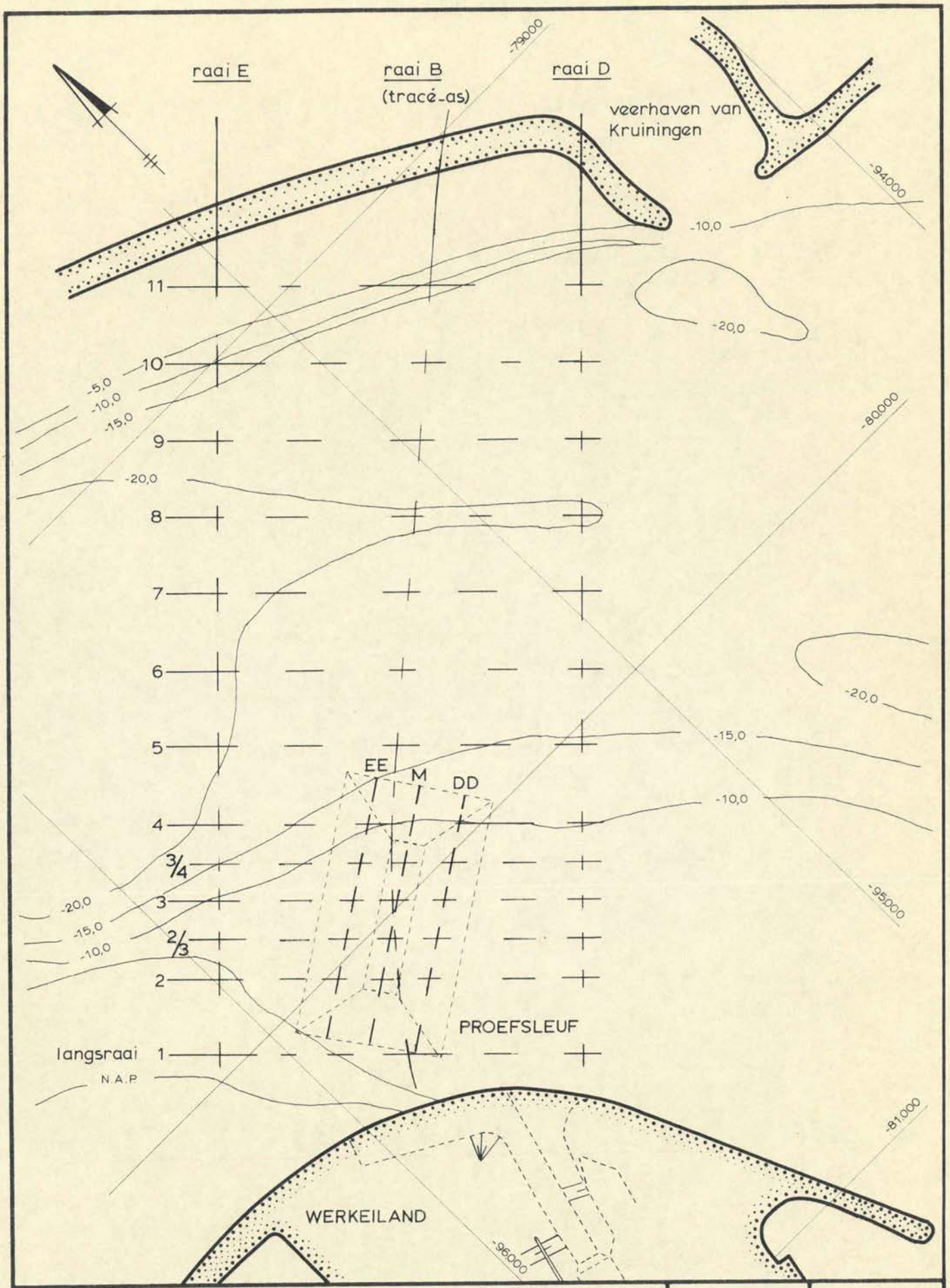
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 8

TO

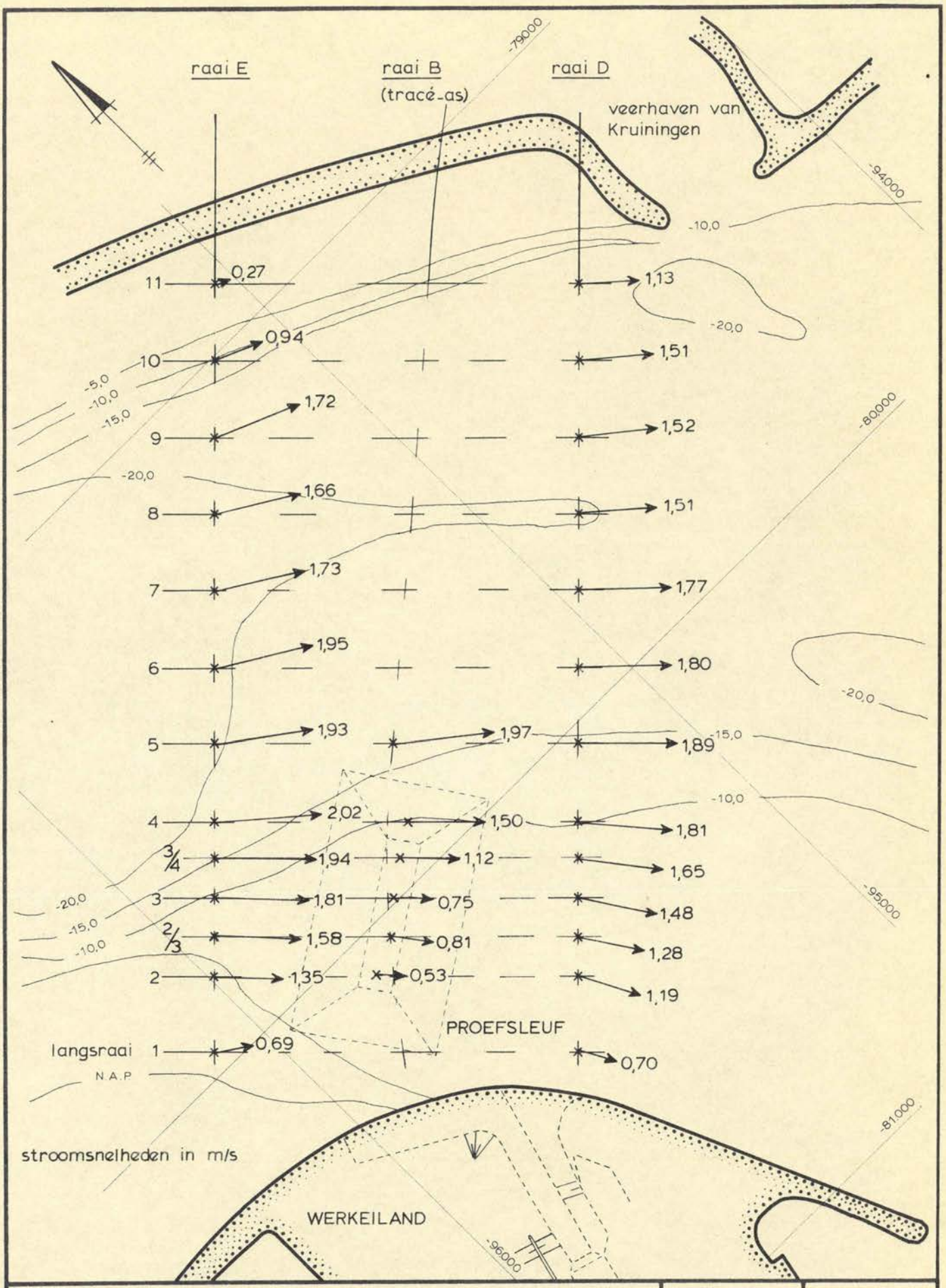
MAX. VLOED/ MAX. EB

M 1734

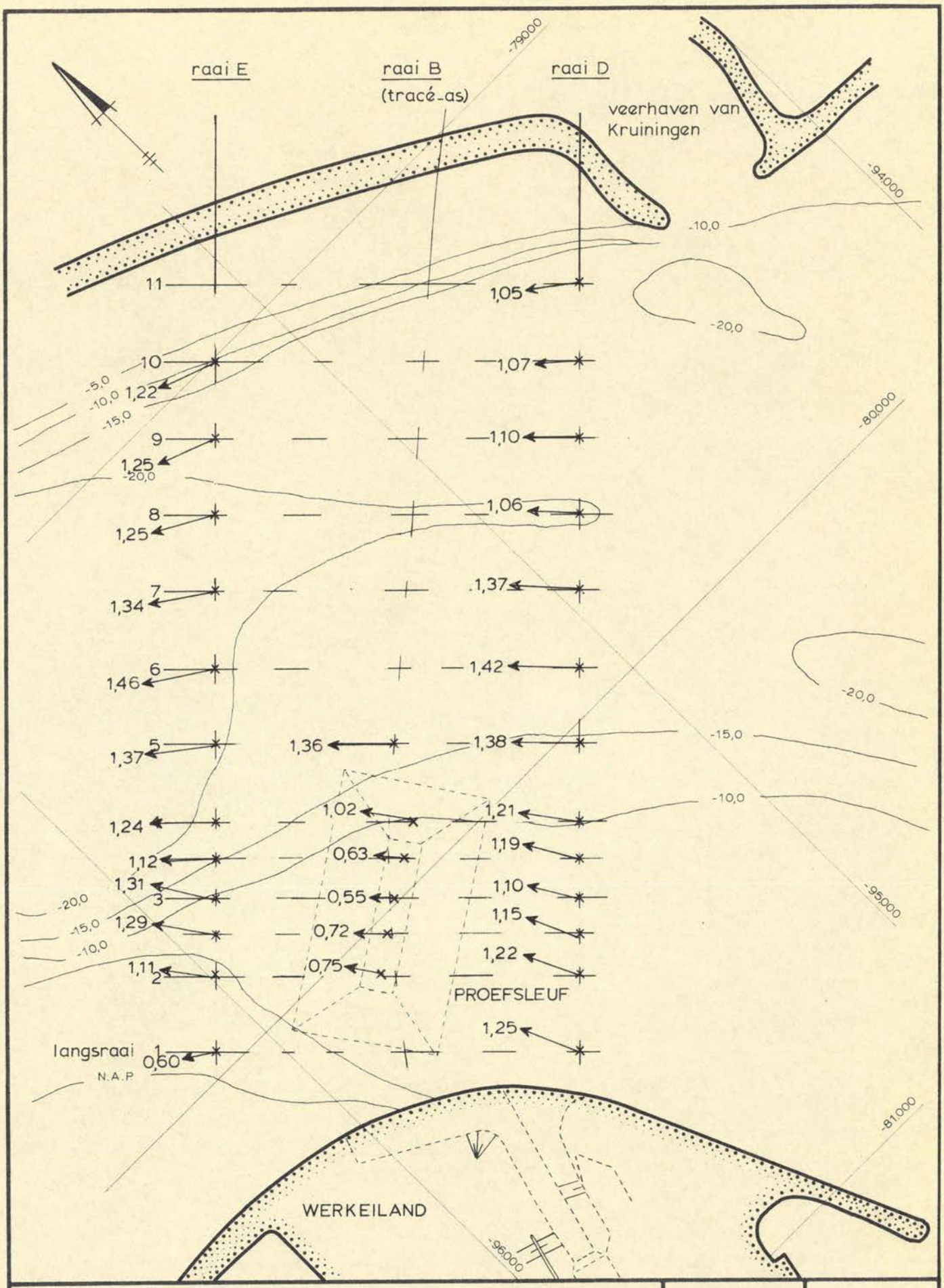
FIG. 15



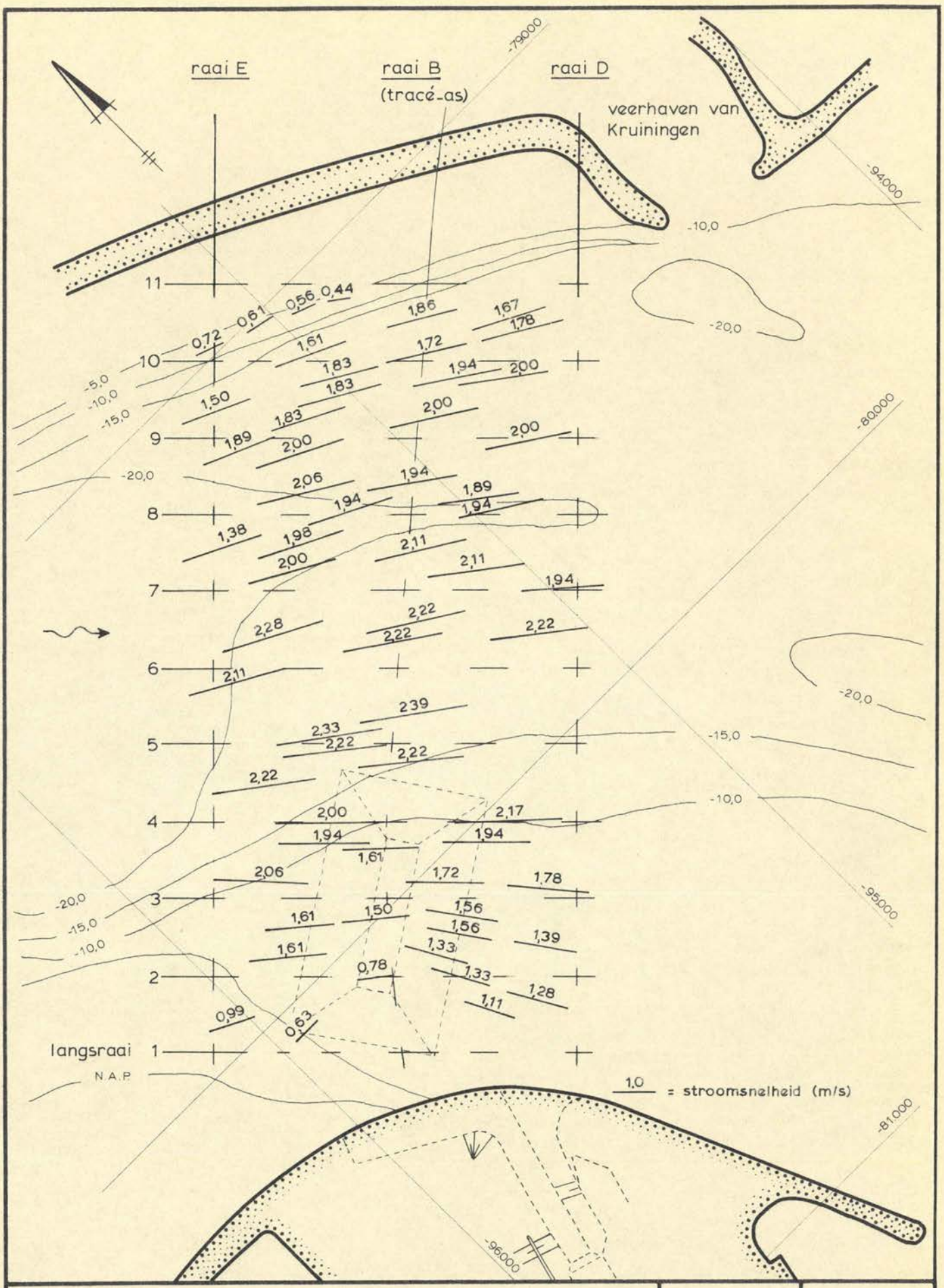
SITUATIE PROEFSLEUF	T1	
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 16



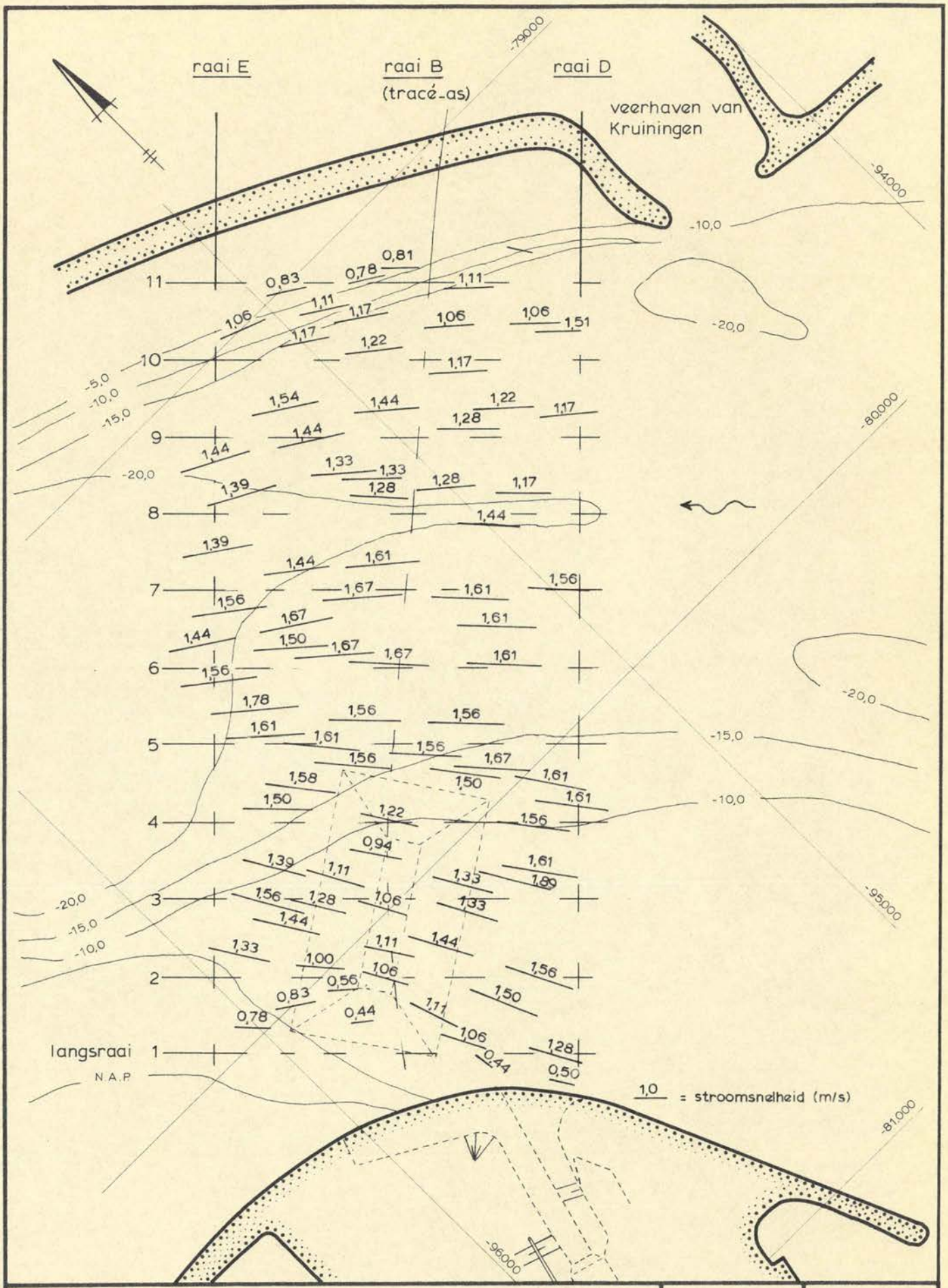
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T1	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 17



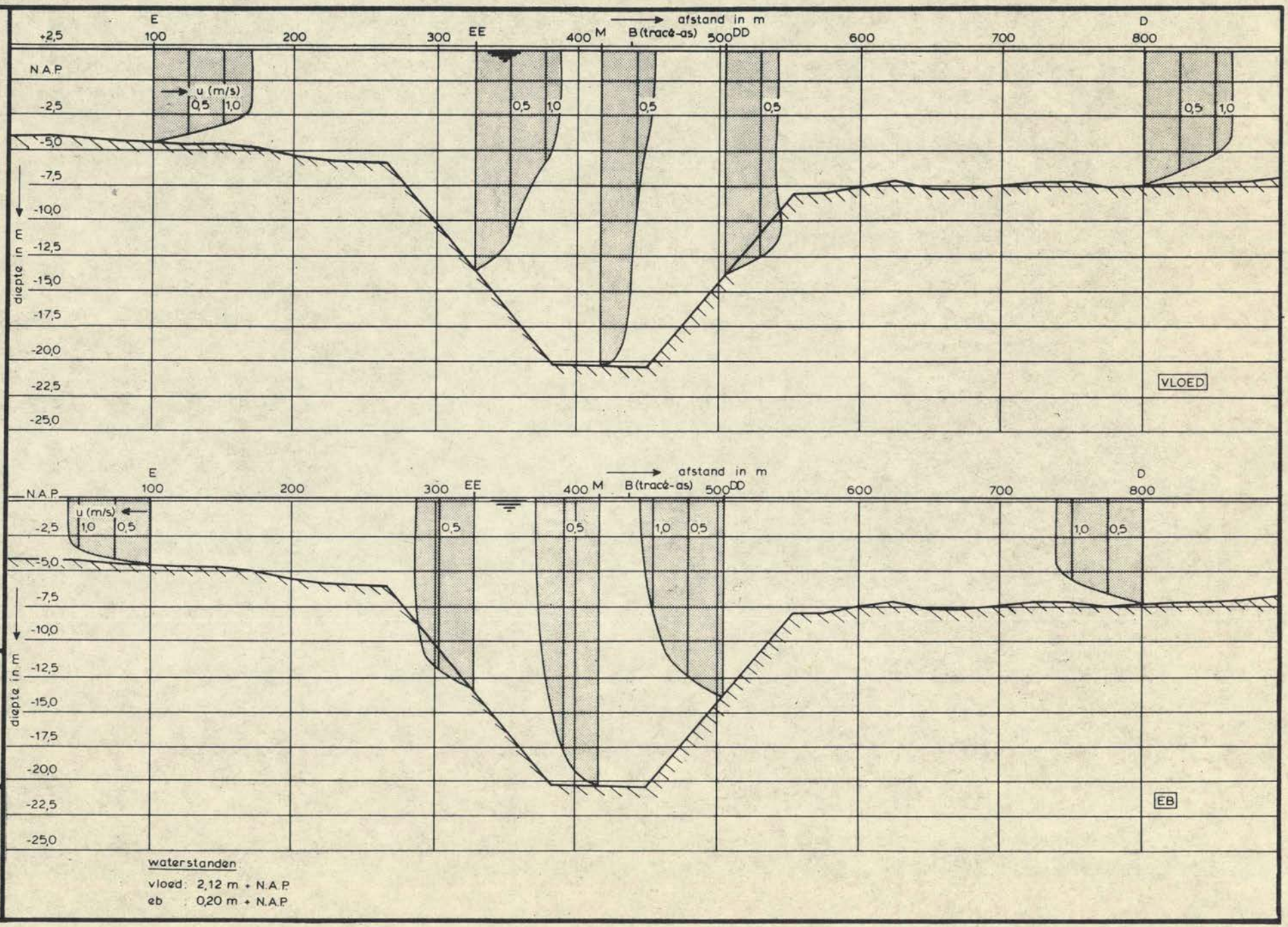
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T1	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 18



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T1	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 19



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T1	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 20



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

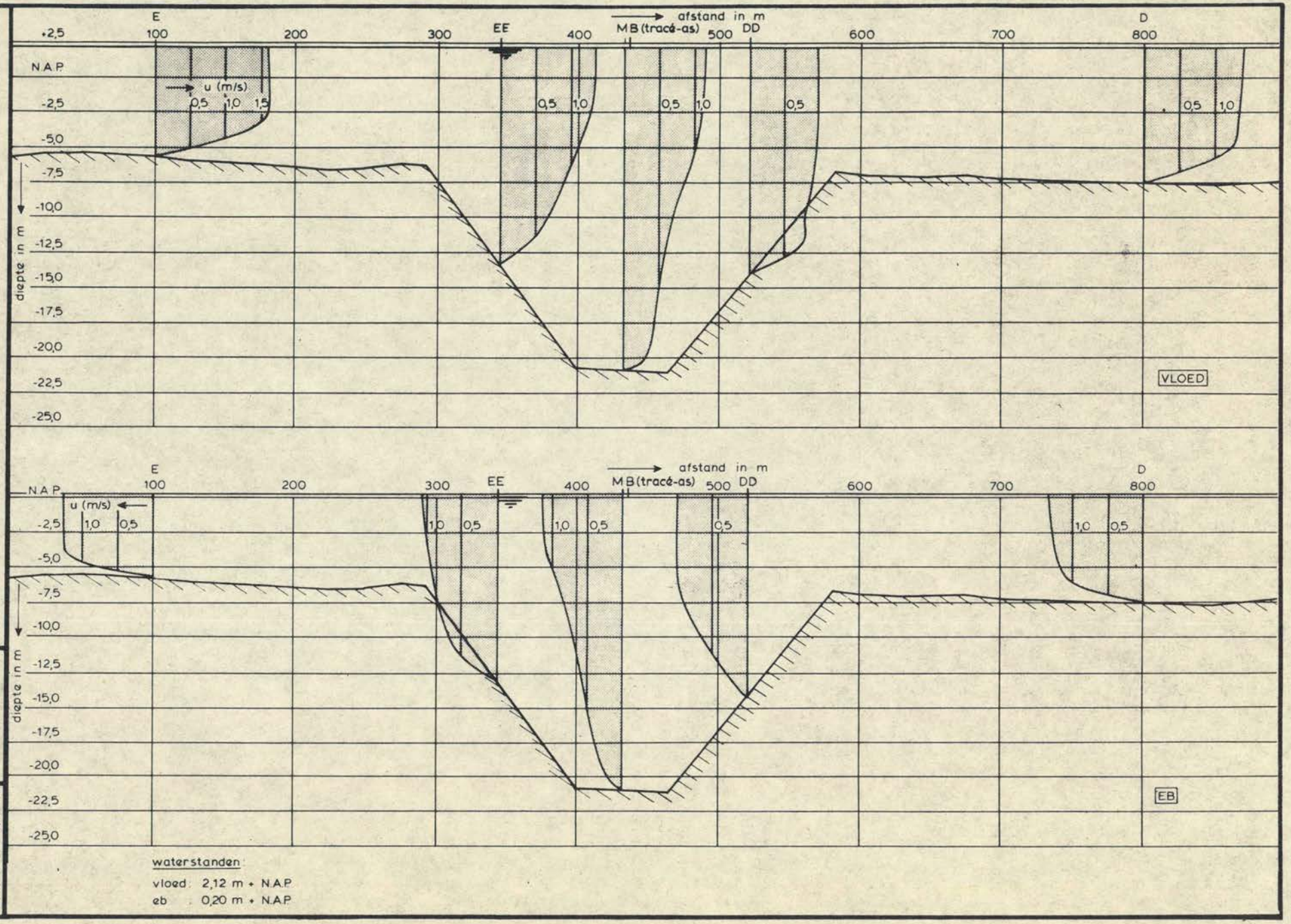
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 2

T1

MAX. VLOED/
MAX. EB

M 1734

FIG. 21



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

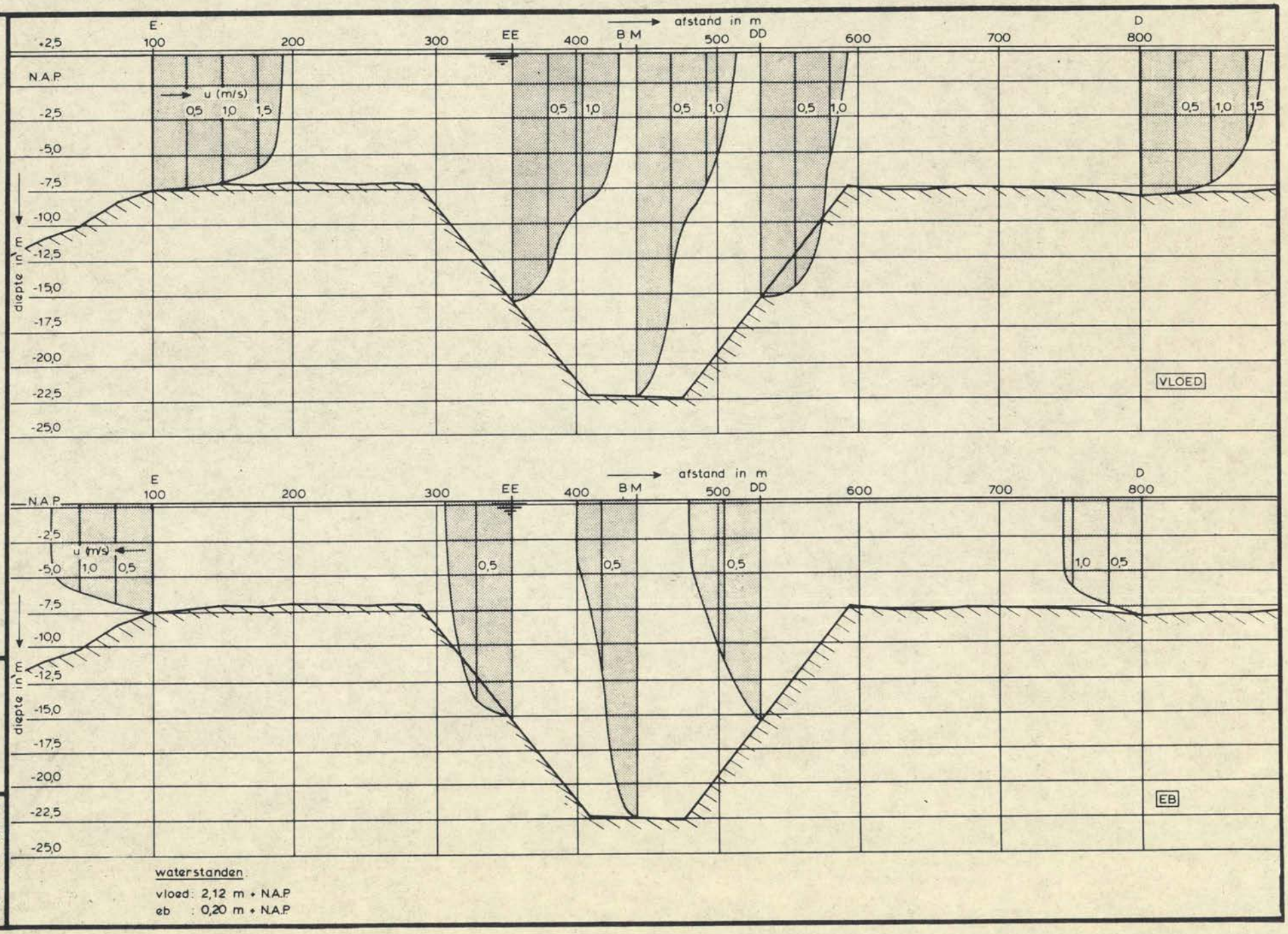
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 2/3

T1

MAX. VLOED/
MAX. EB

M 1734

FIG. 22



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

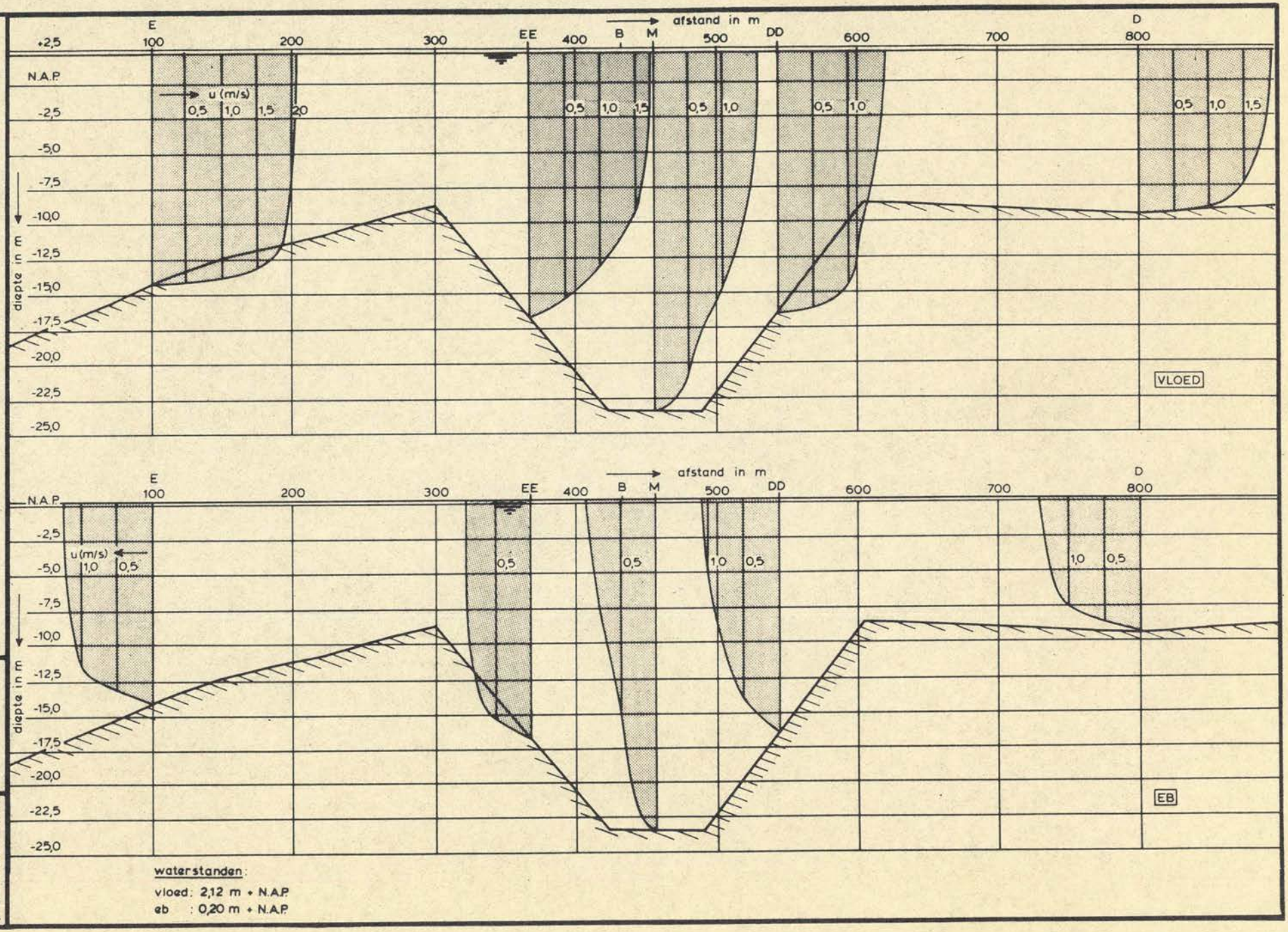
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 3

T1

MAX. VLOED/ MAX. EB

M 1734

FIG. 23



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

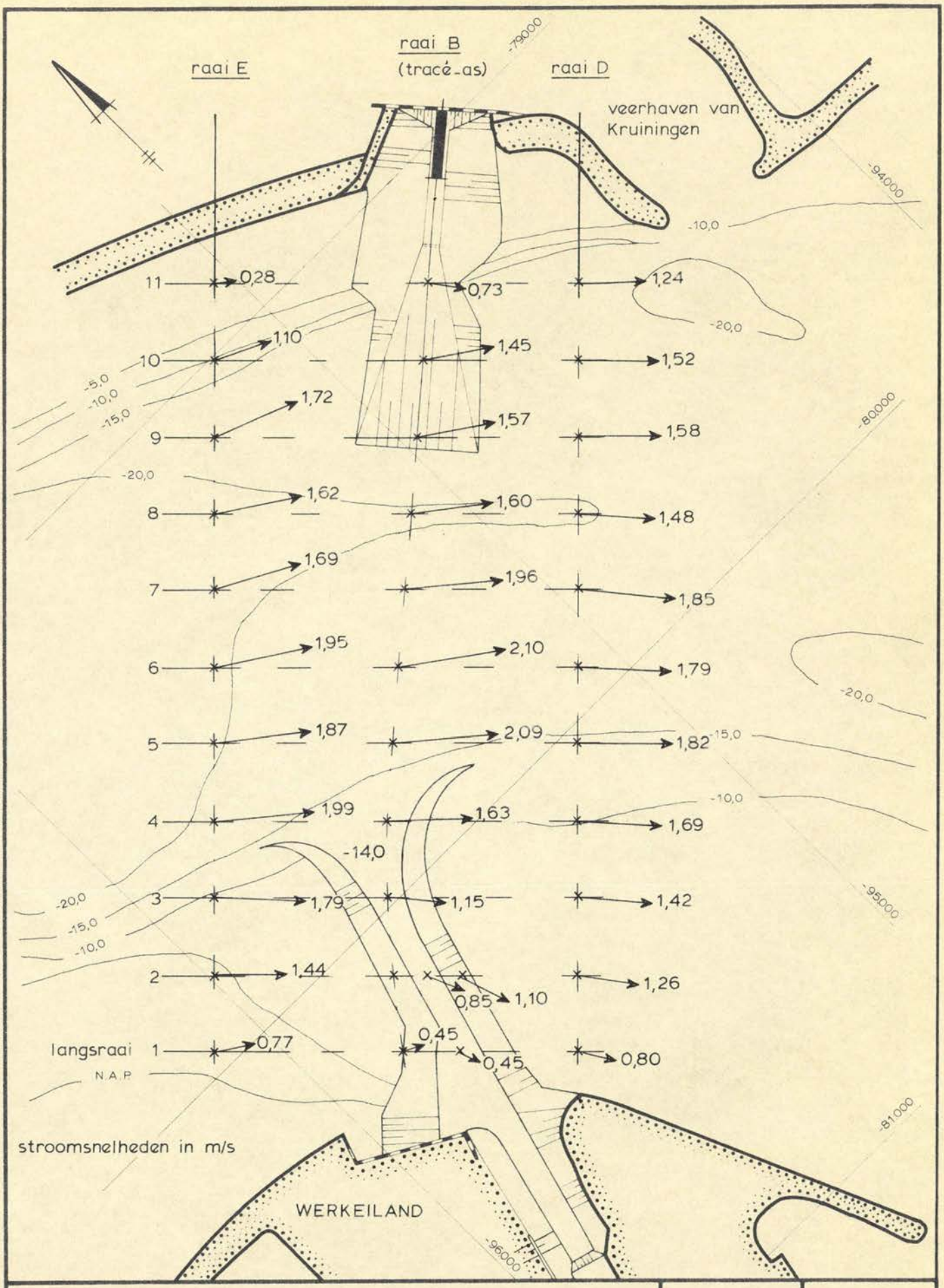
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 3/4

T1

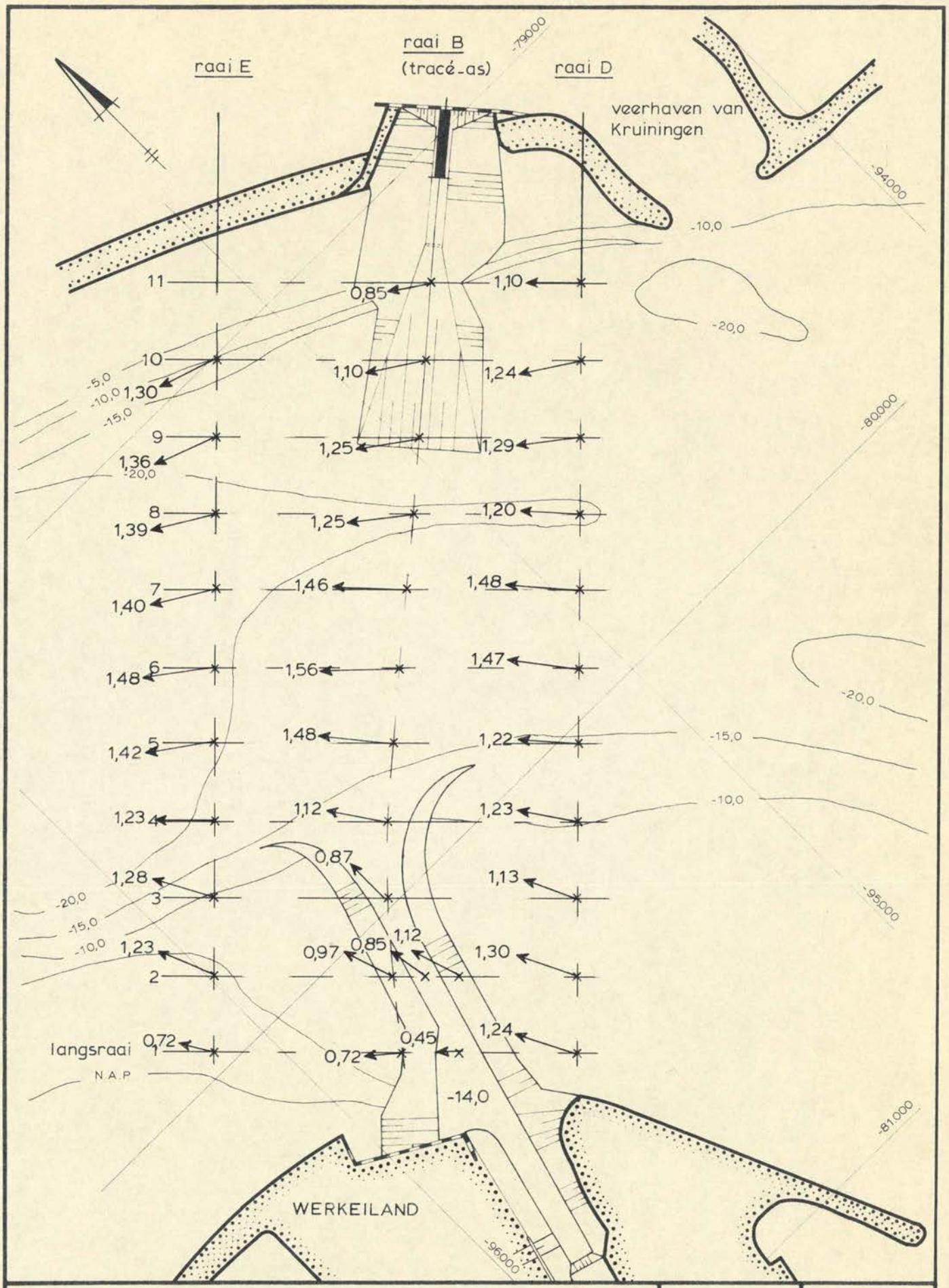
MAX. VLOED/
MAX. EB

M 1734

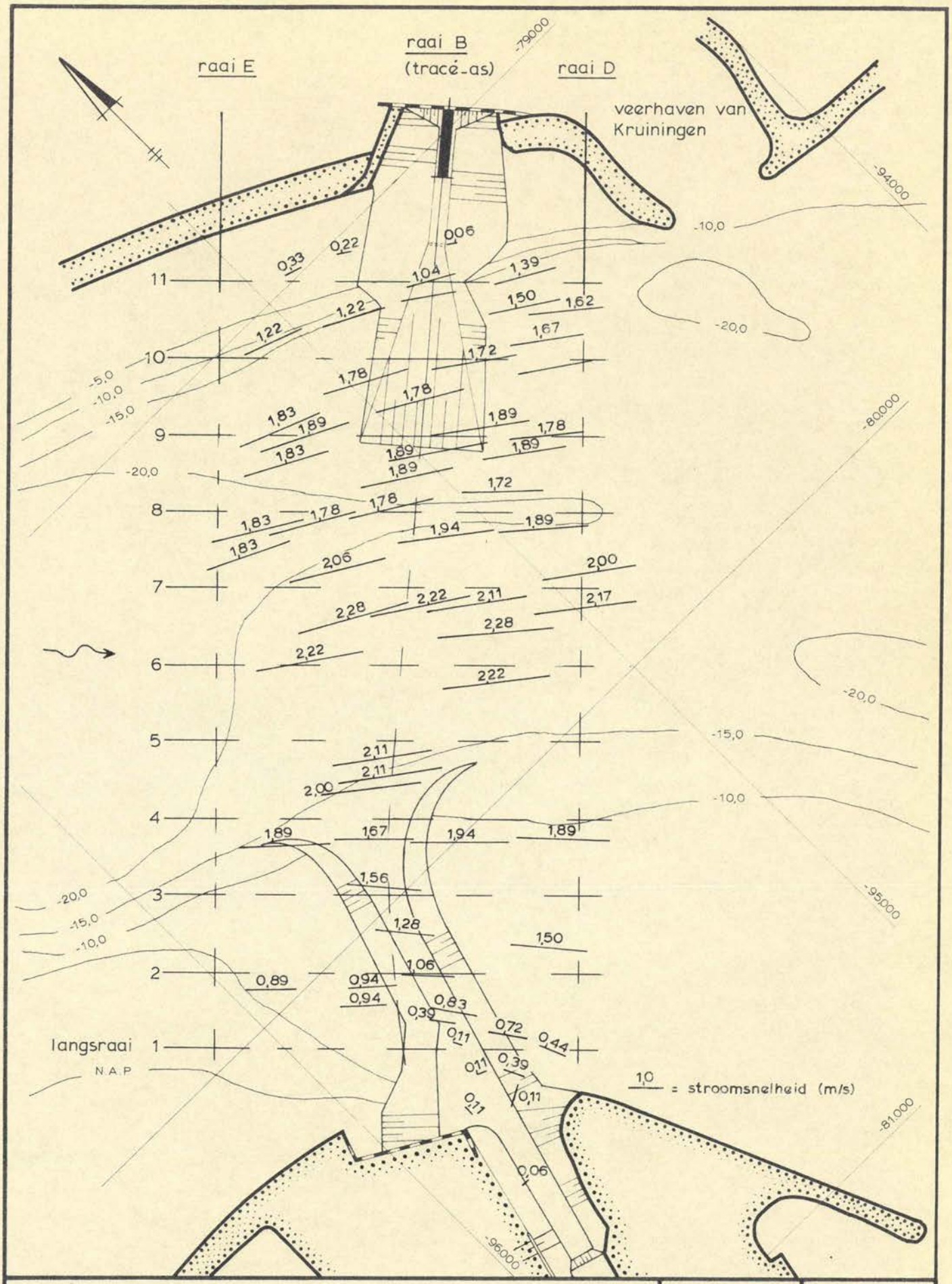
FIG. 24



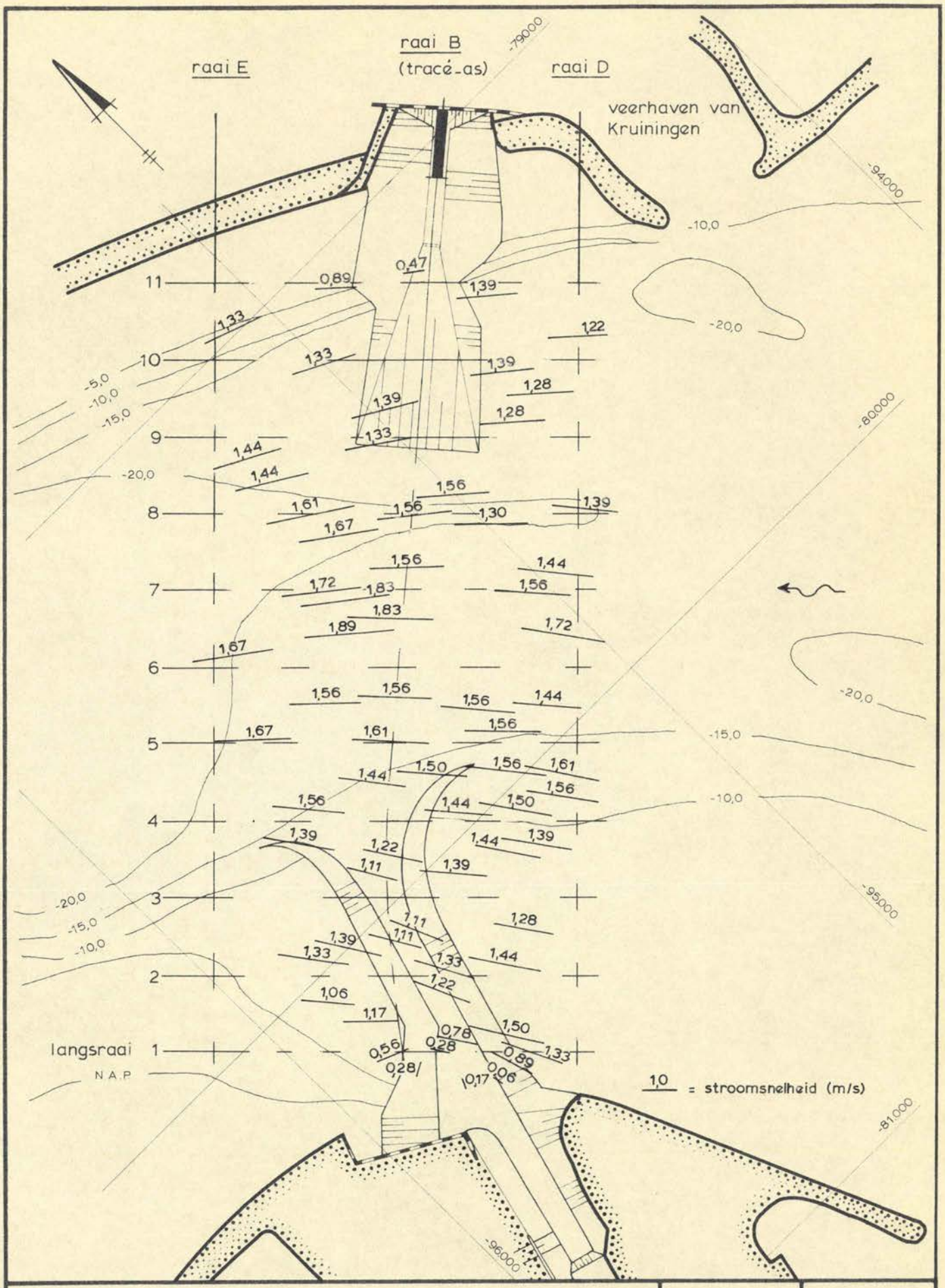
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T2	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 25



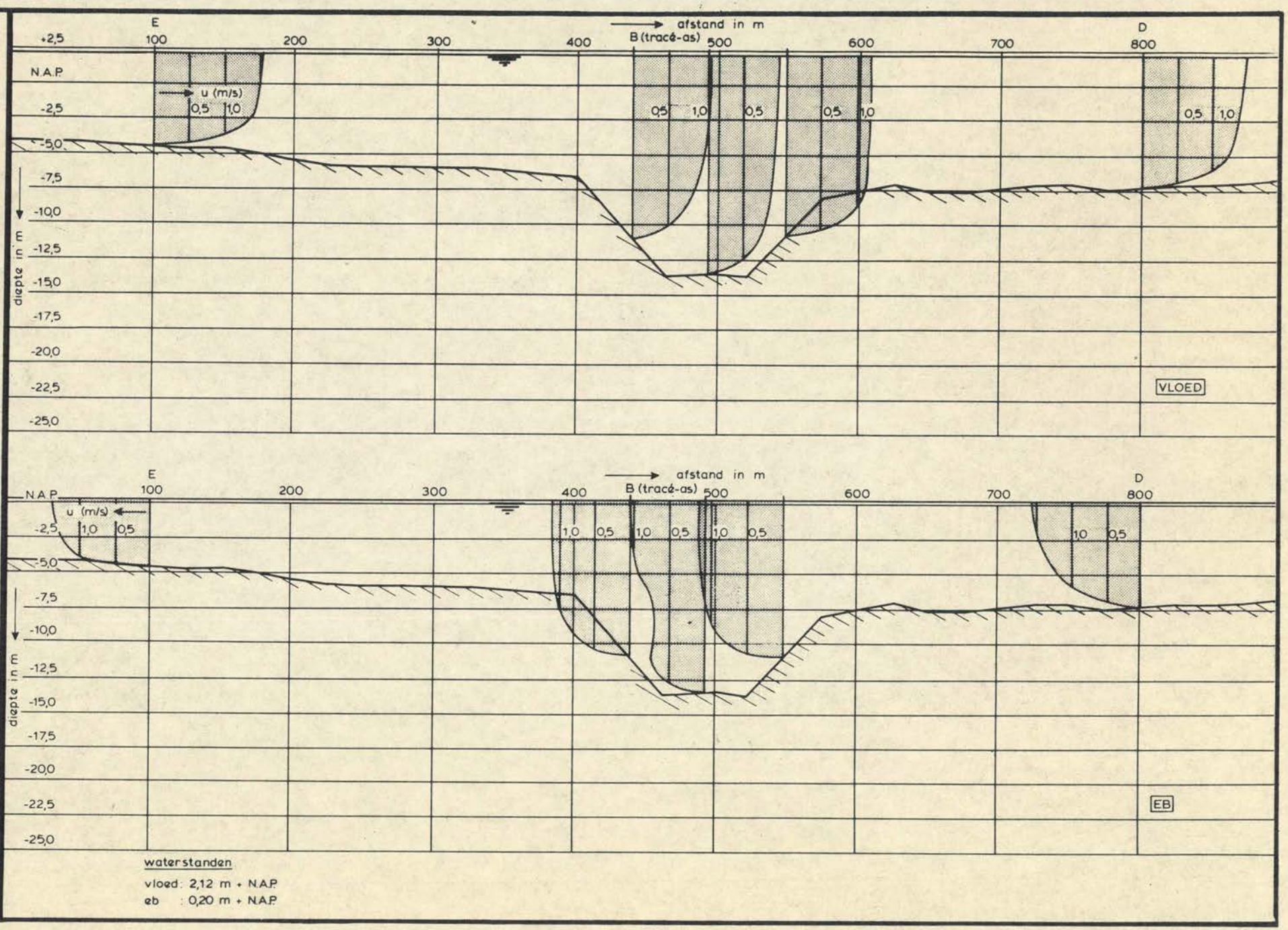
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T2	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 26



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T2	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 27



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T2	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 28



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

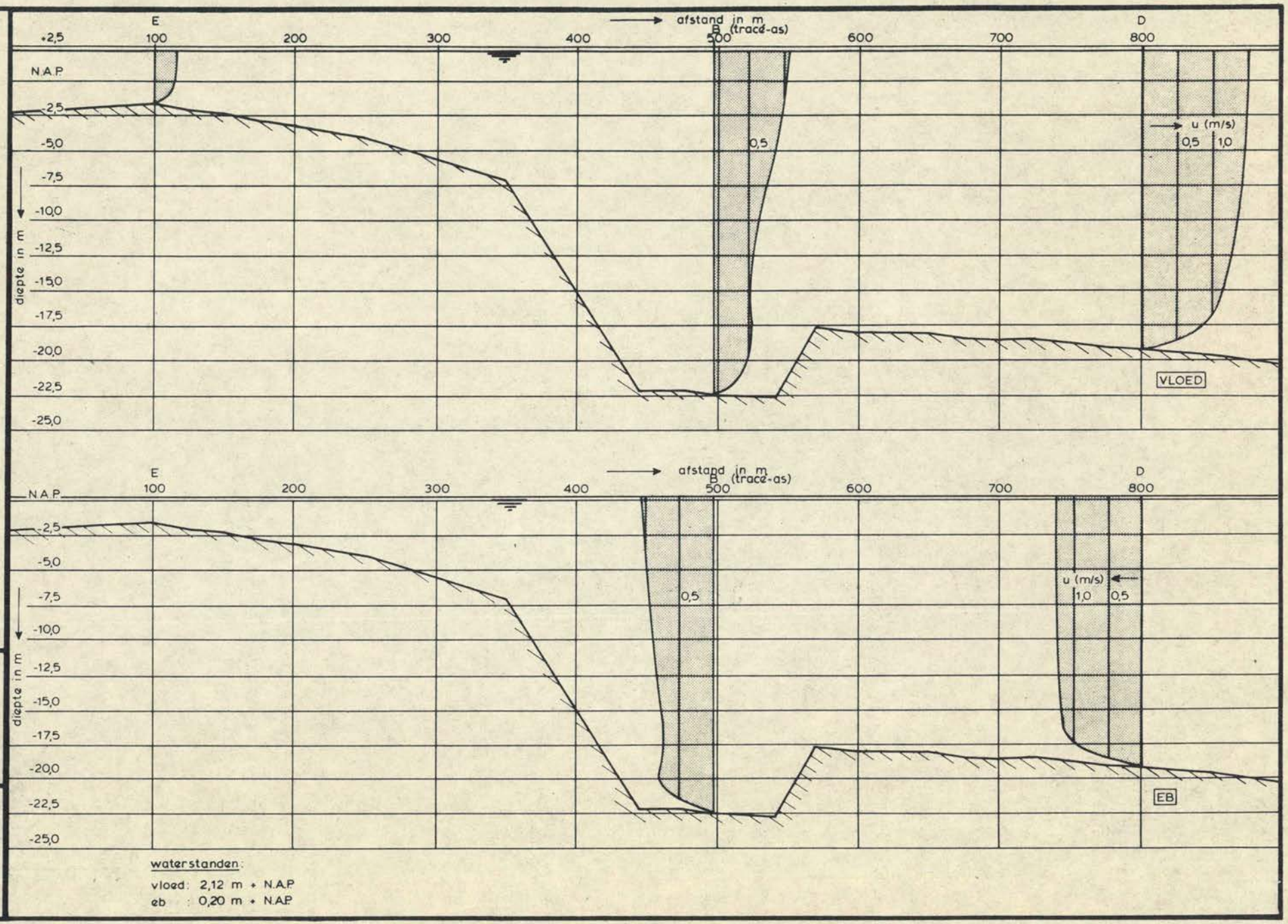
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 2

M 1734

T2

MAX. VLOED/
MAX. EB

FIG. 29



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

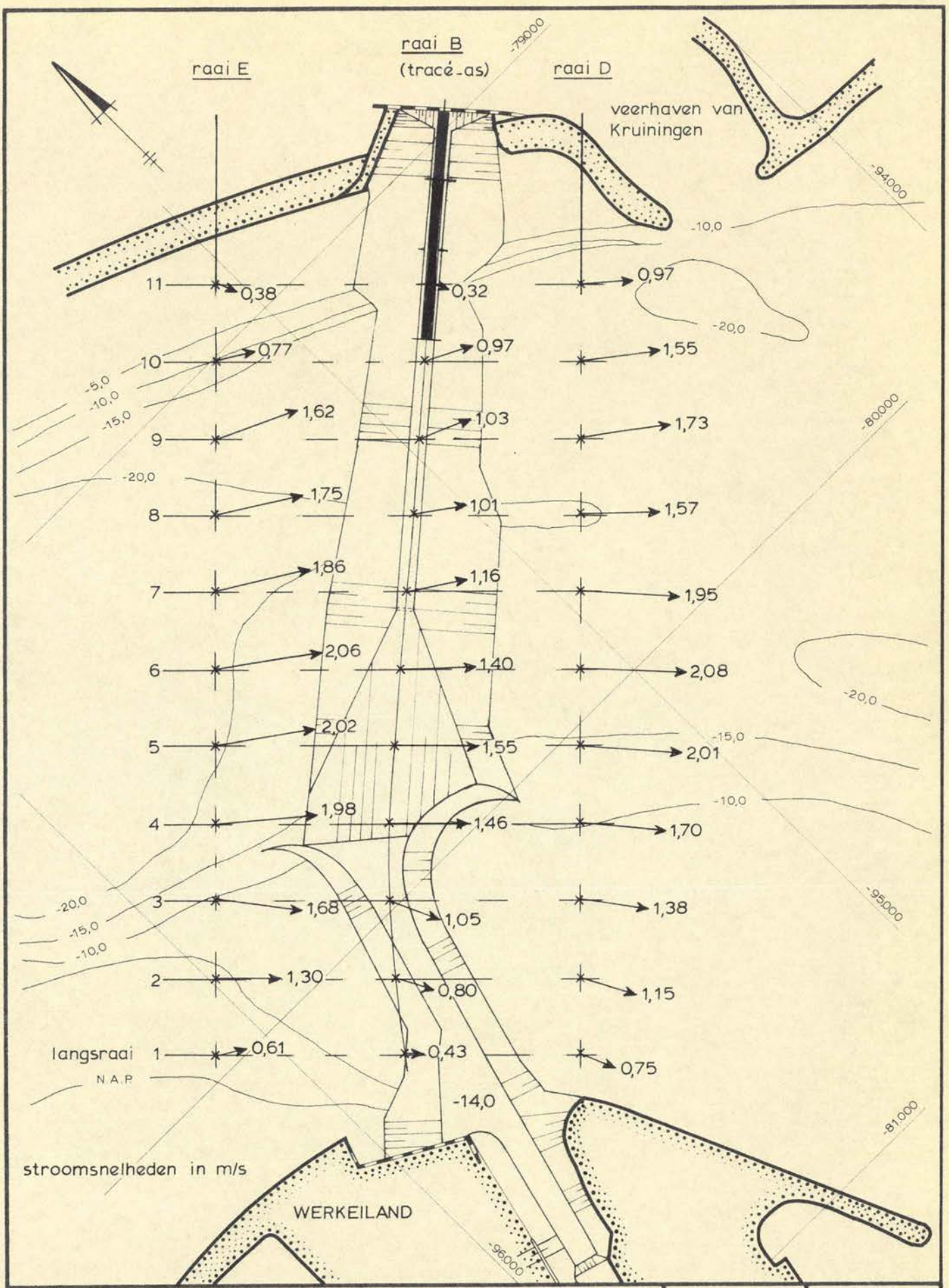
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 11

T2

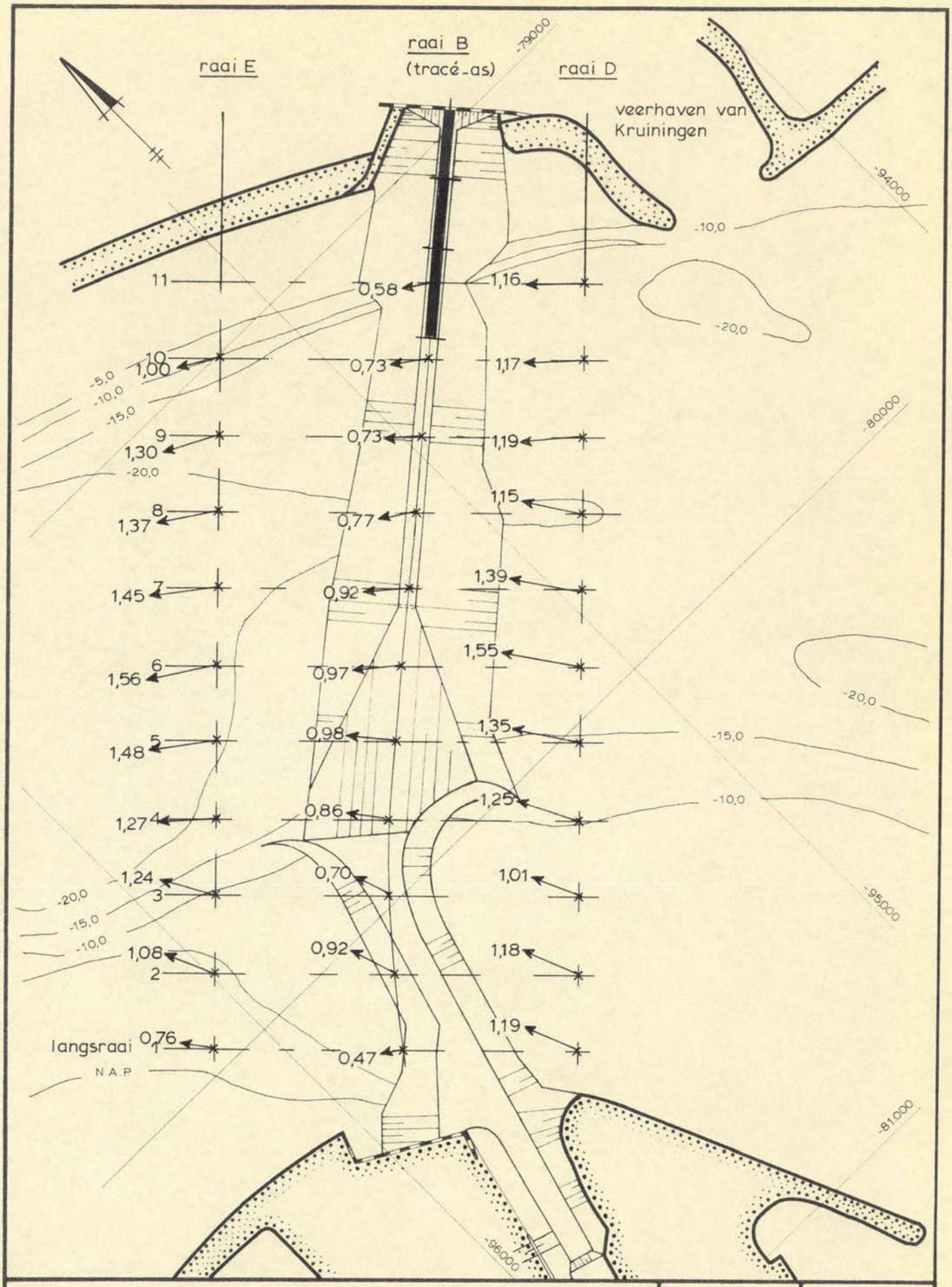
MAX. VLOED/
MAX. EB

M 1734

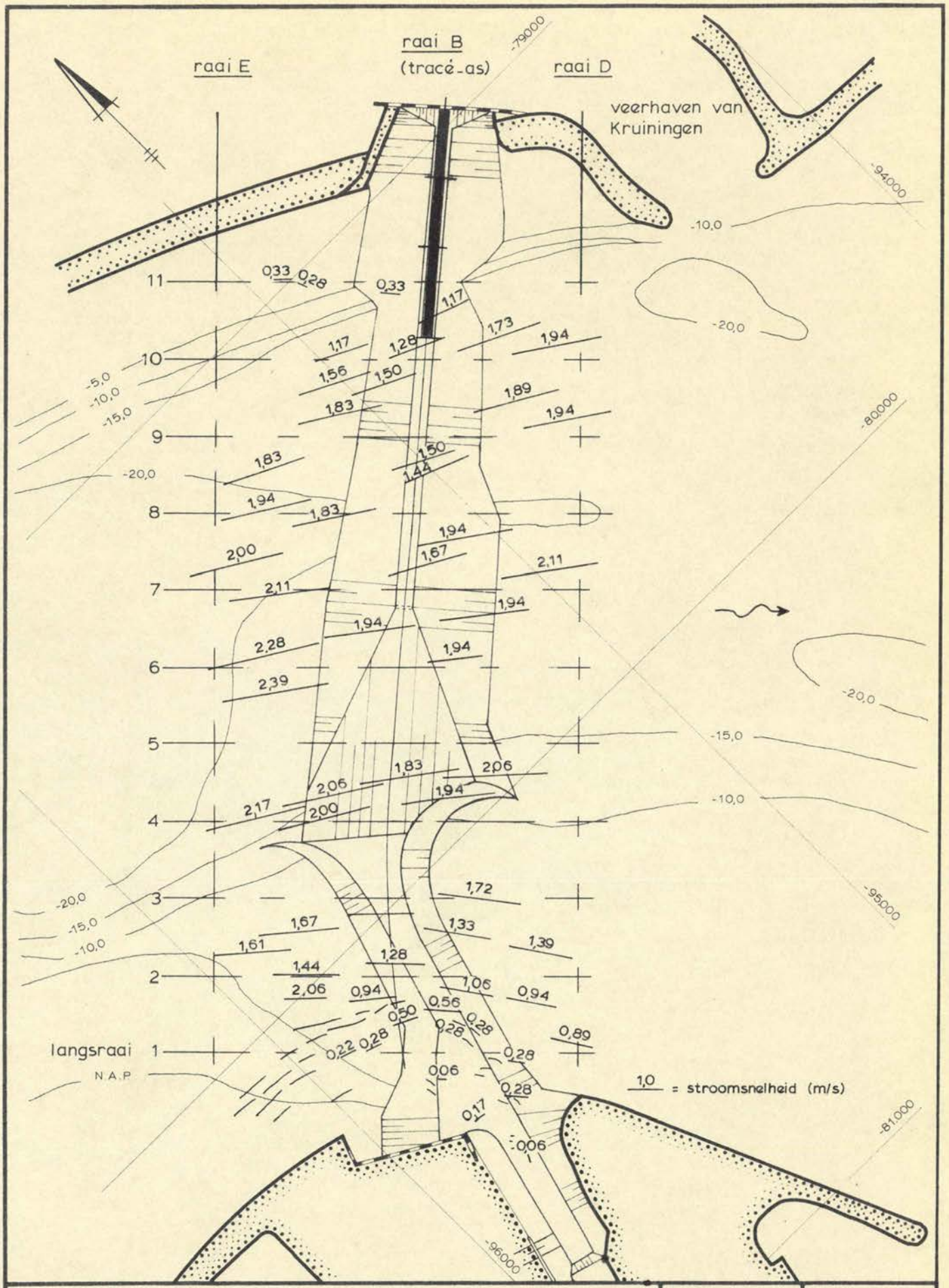
FIG. 30



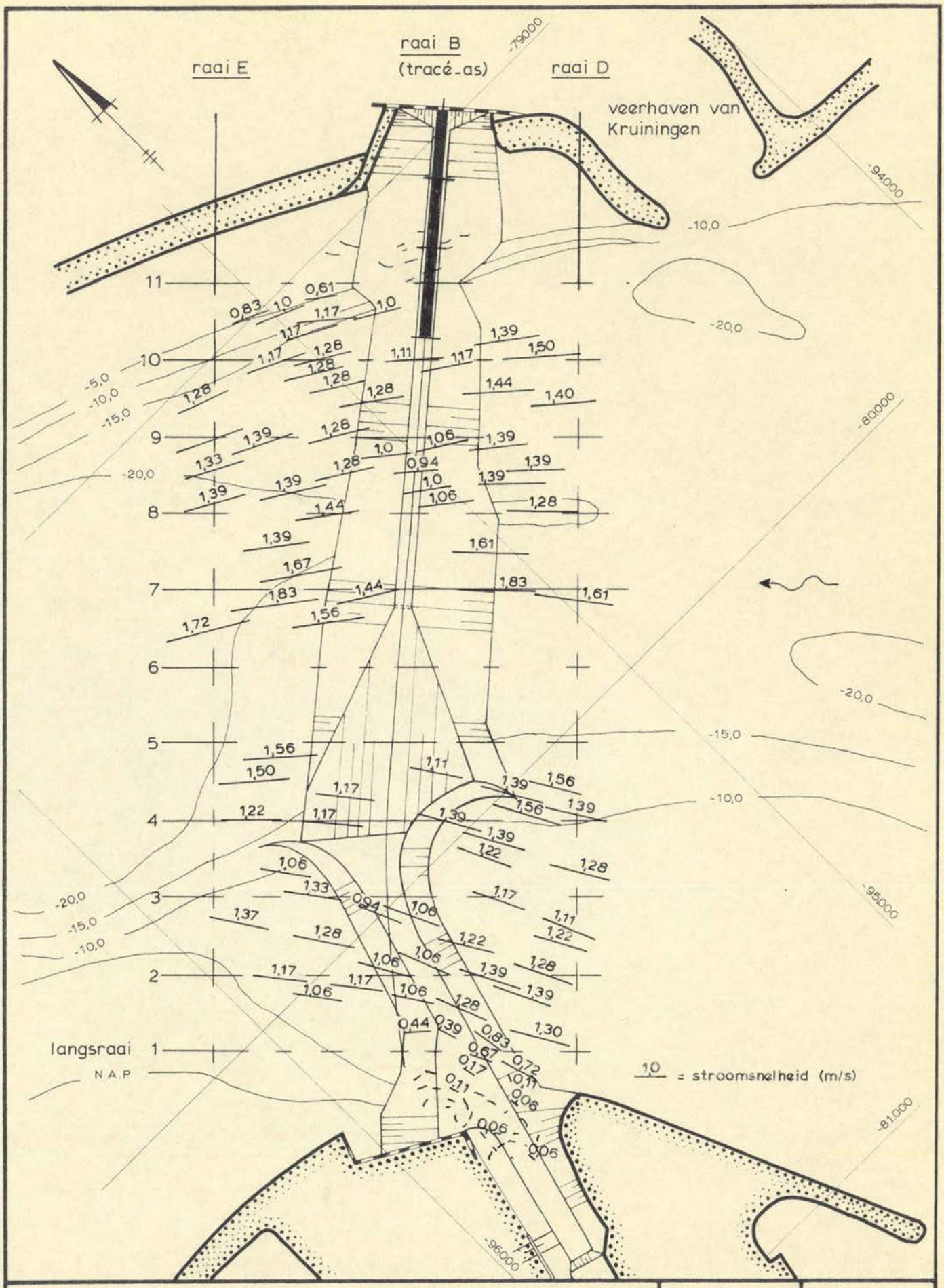
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T3	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 31



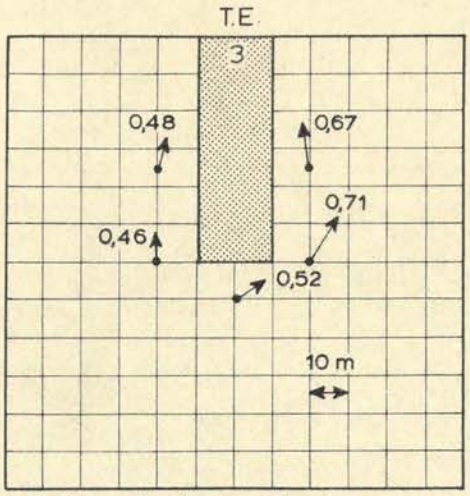
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T3	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 32



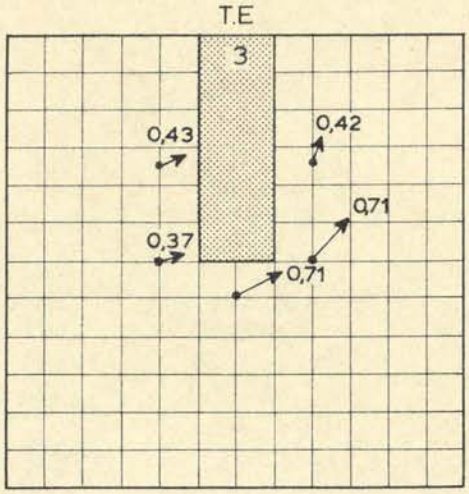
STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T3	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 33



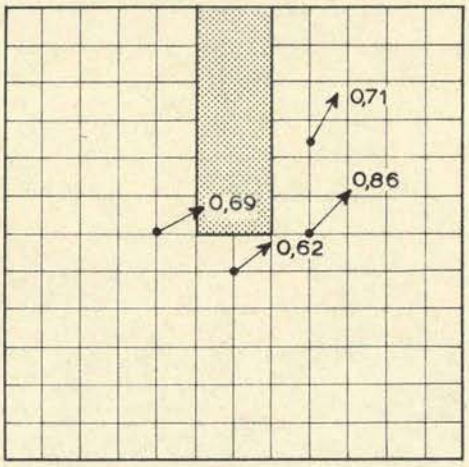
STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T3	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 34



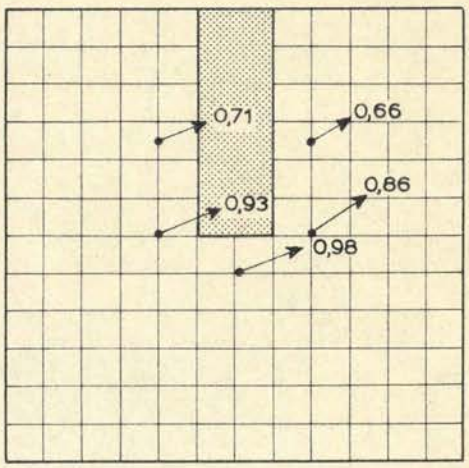
meethoogte boven bodem
= 2,5 m



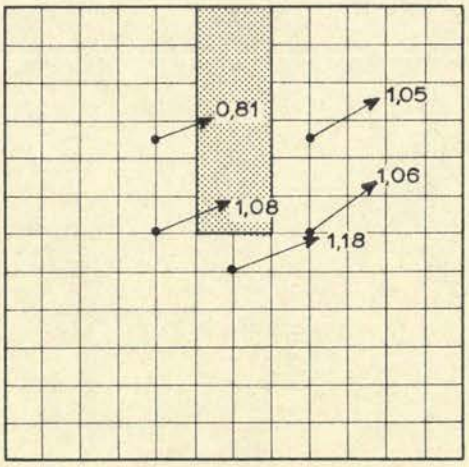
= 7,2 m



= 11,8 m

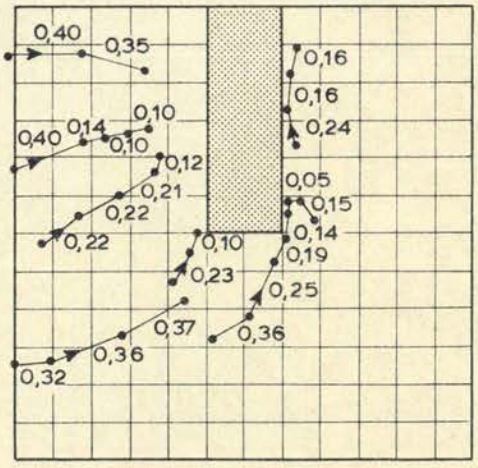


= 19,8 m



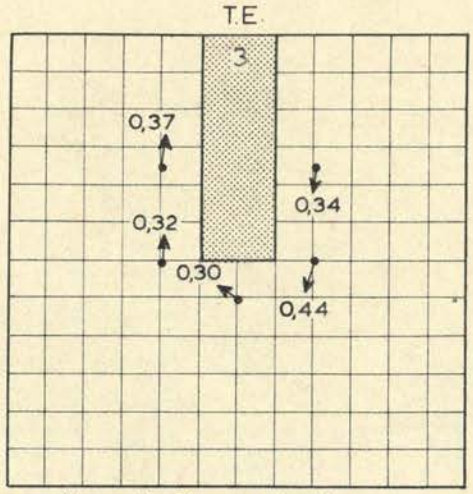
= 29,2 m

(tunneldak = 9,2 m boven bodem)



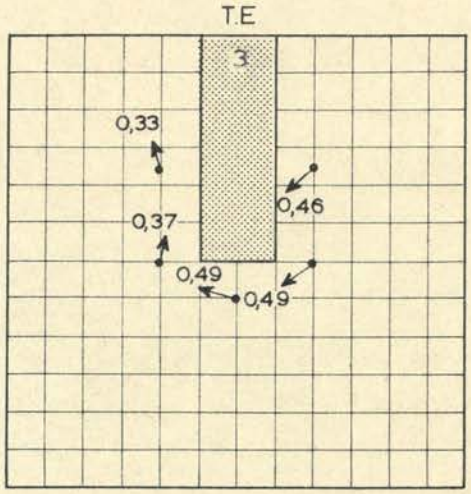
bodemsnelheden

STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T3	MAX. VLOED
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 35

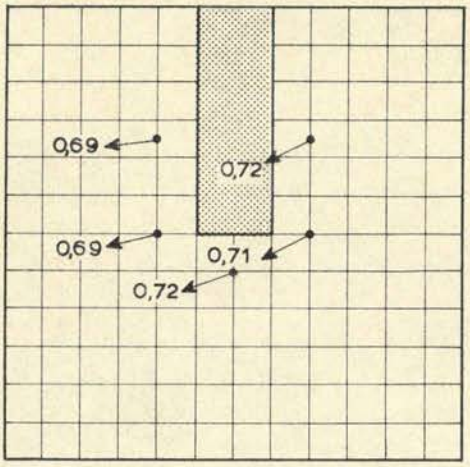


meethoogte boven bodem

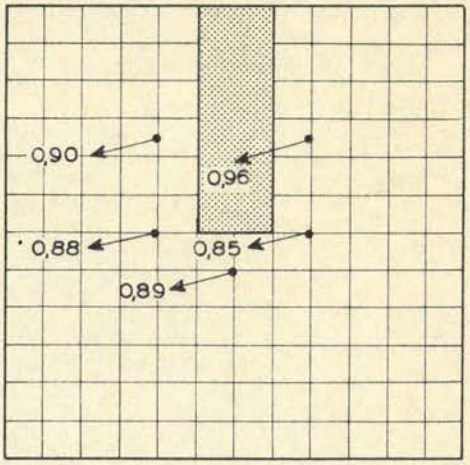
= 2,5 m



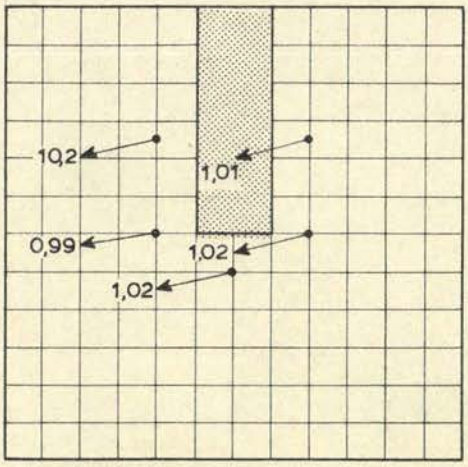
= 6,8 m



= 11,1 m

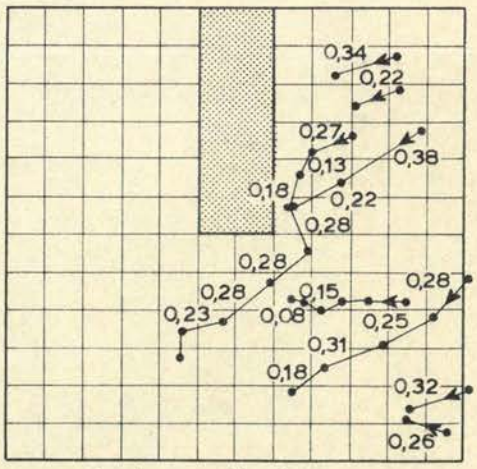


= 18,5 m



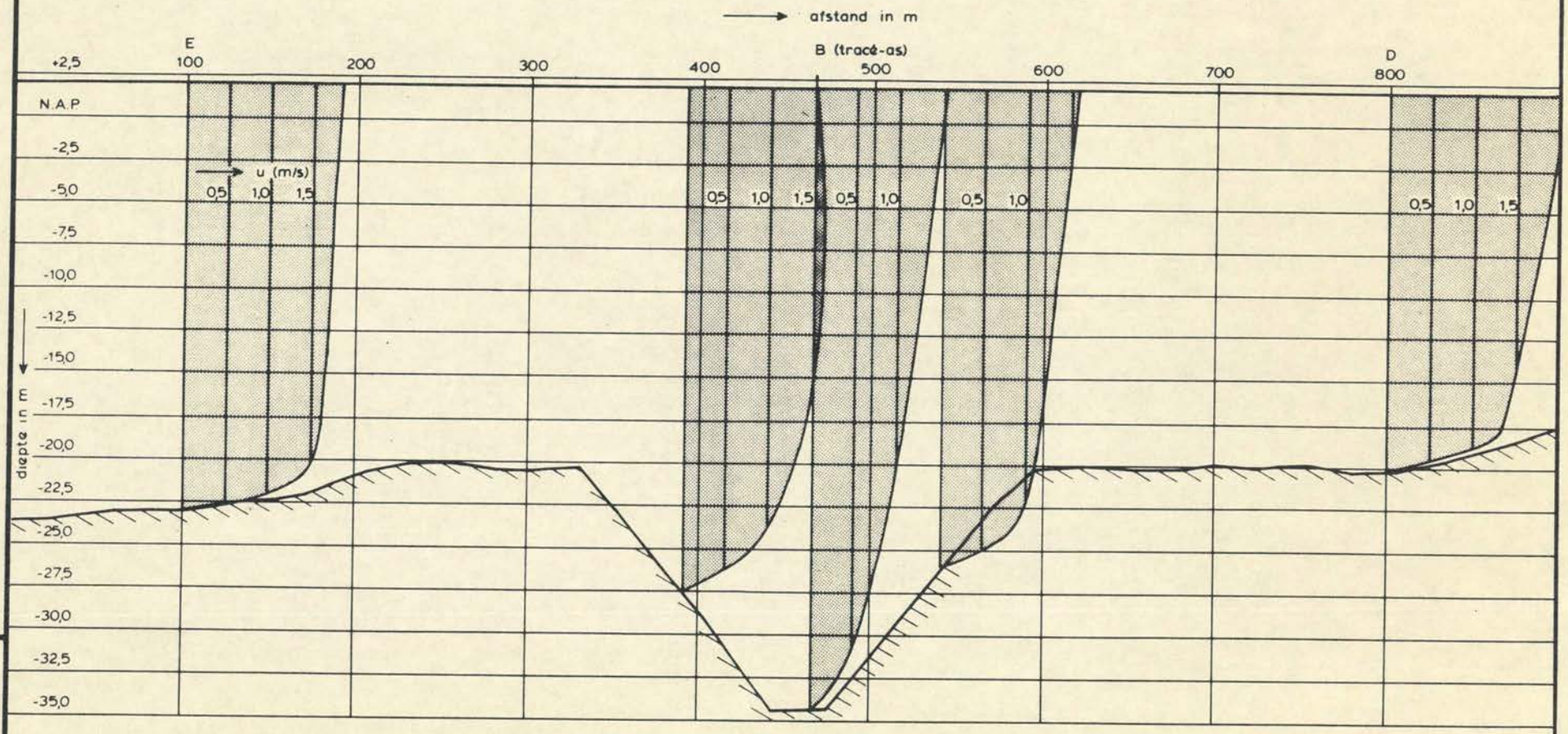
= 27,3 m

(tunneldak = 9,2 m boven bodem)



bodemsnelheden

STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T3	MAX. EB
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 36



waterstanden:

vloed 2,12 m + N.A.P.
eb 0,20 m + N.A.P.

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 8

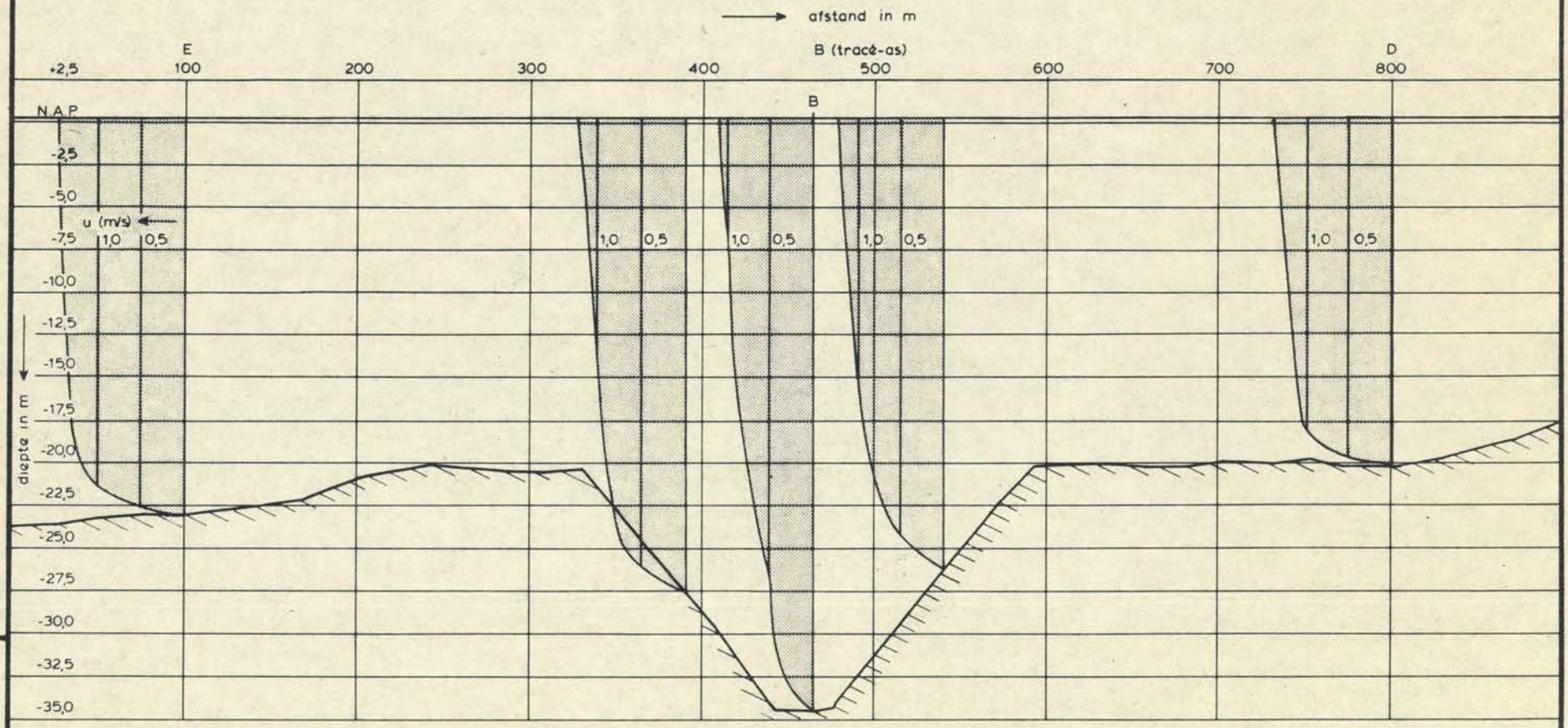
T3

MAX. VLOED

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1734

FIG. 37



waterstanden

vloed: 2,12 m + N.A.P.
eb : 0,20 m + N.A.P.

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 8

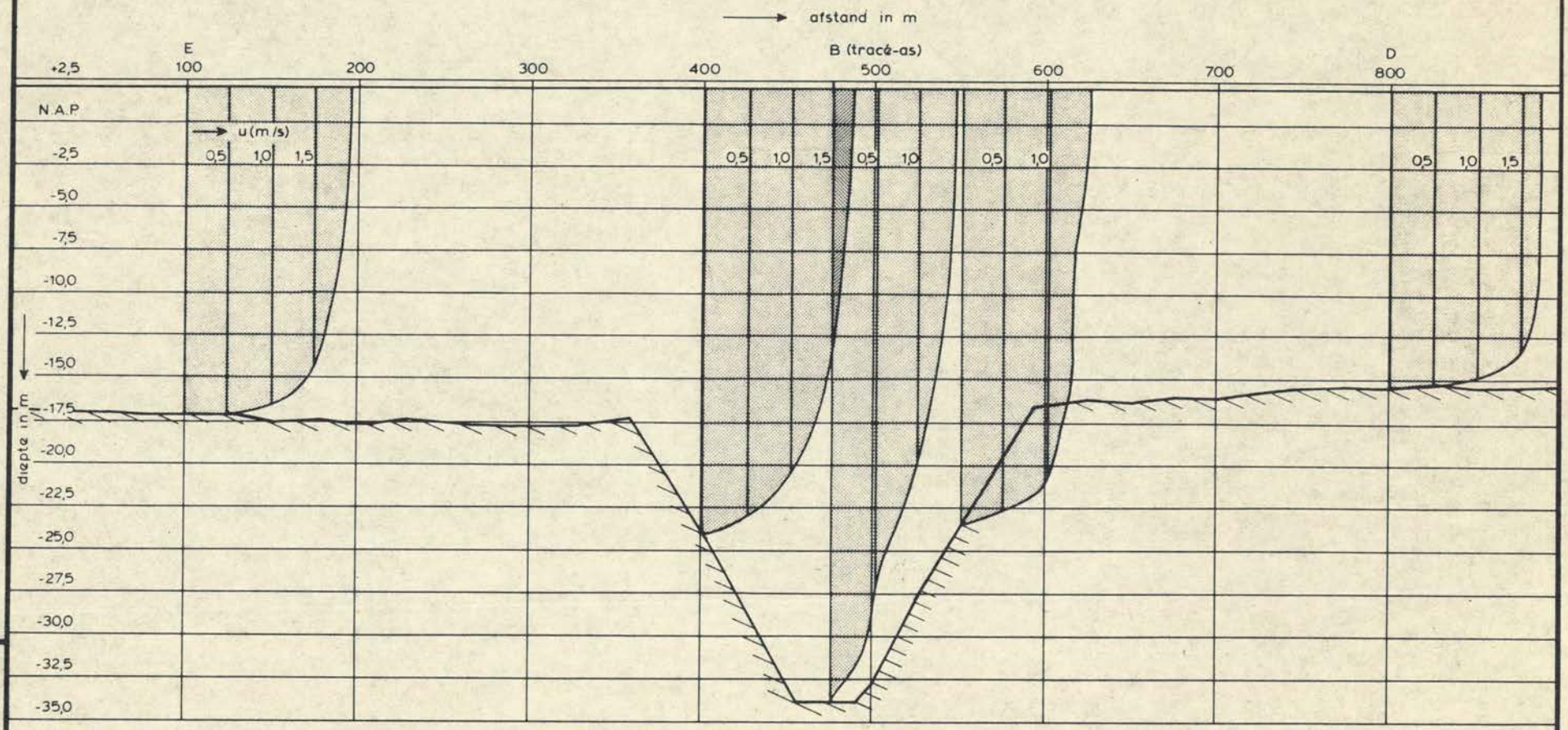
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T3

MAX. EB

M 1734

FIG. 38



waterstanden:

vloed: 2,12 m + N.A.P.
eb : 0,20 m + N.A.P.

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 9

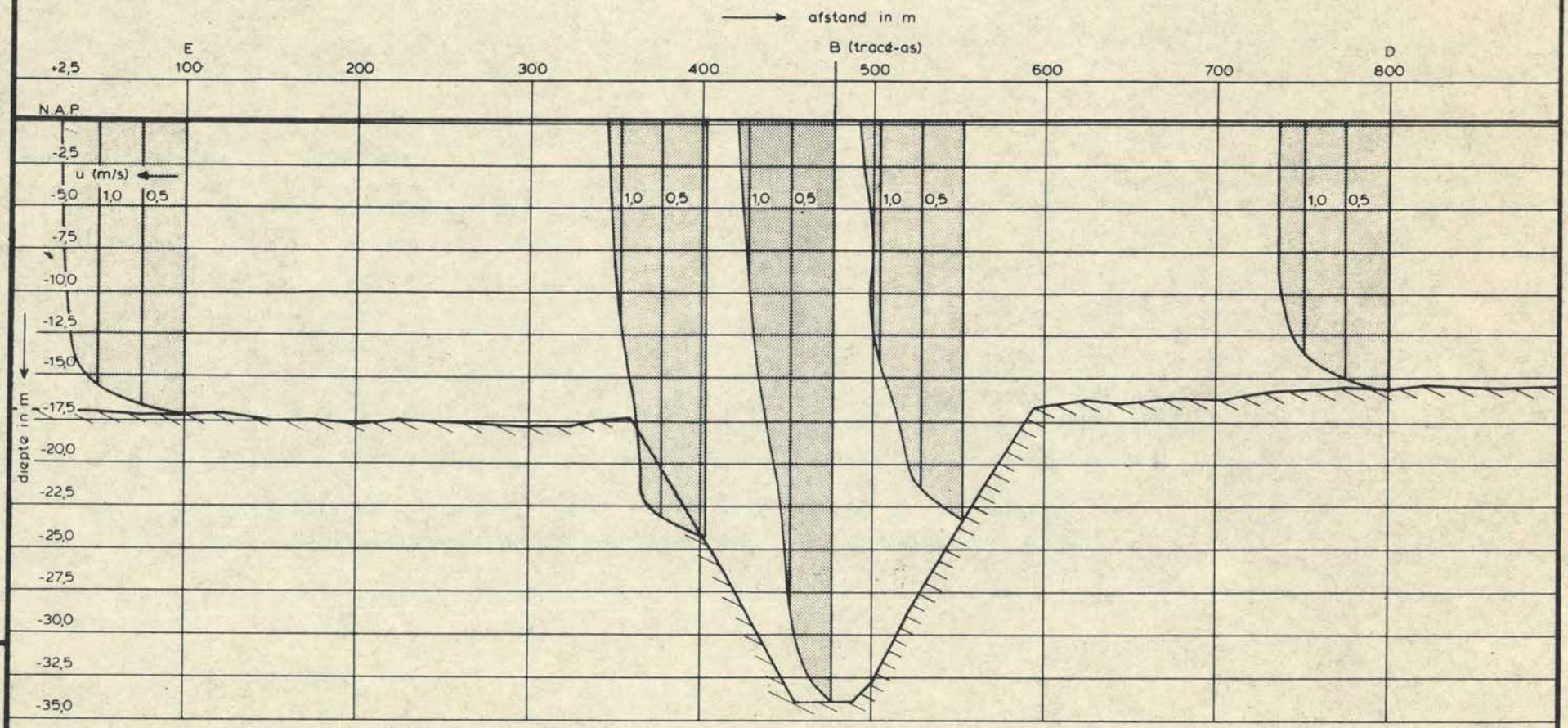
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T3

MAX. VLOED

M 1734

FIG. 39



STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 9

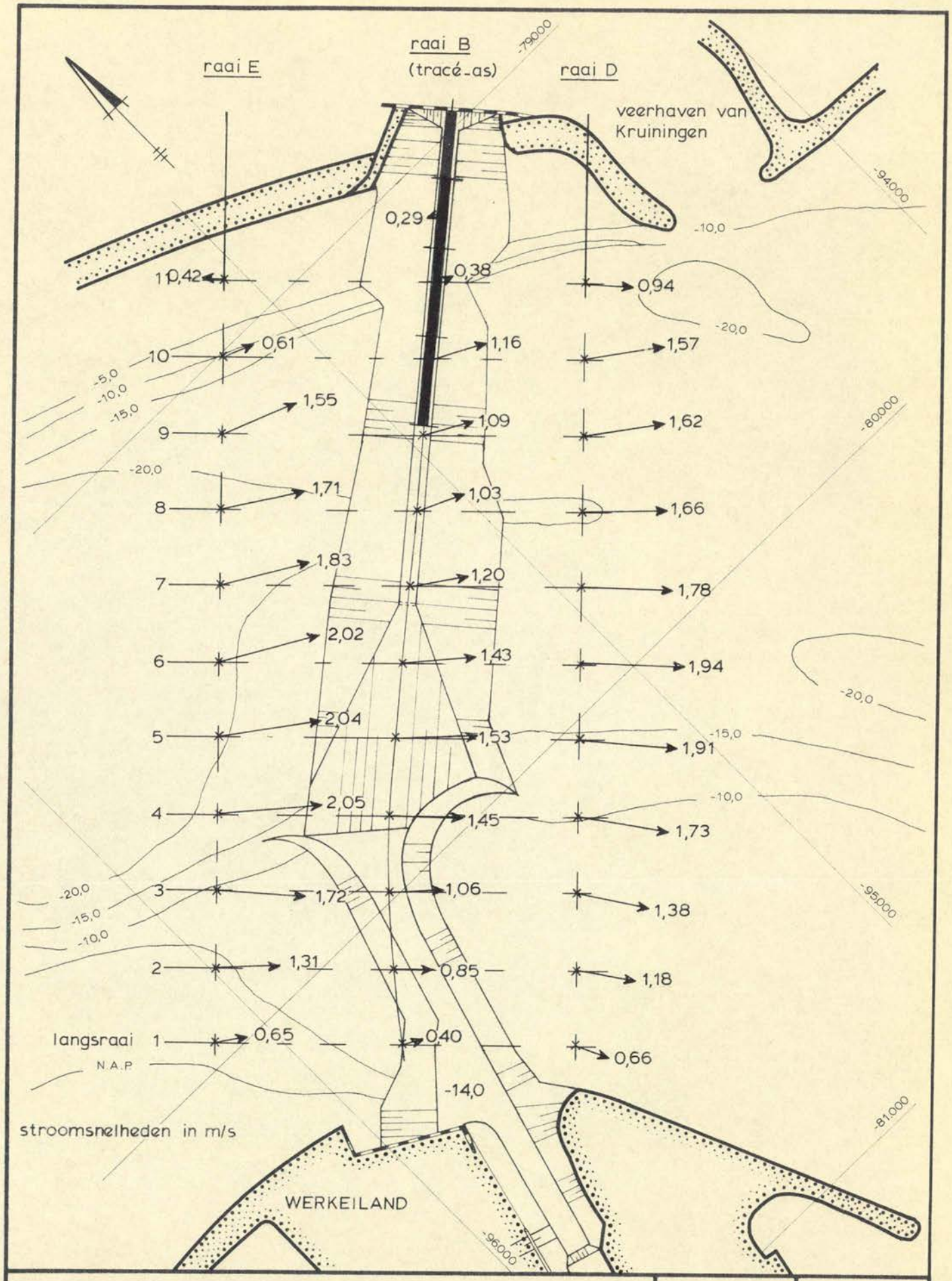
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T3

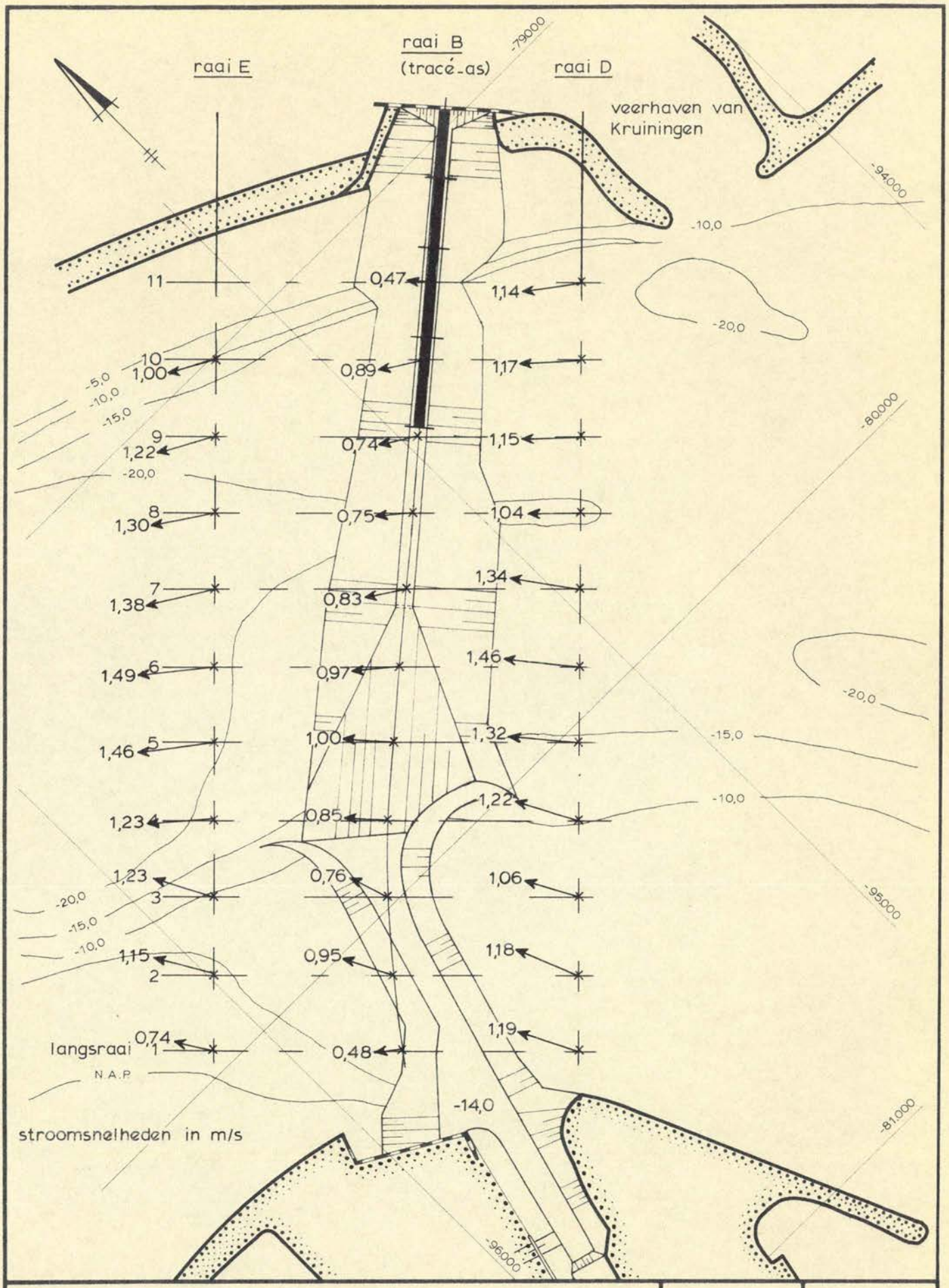
MAX. EB

M 1734

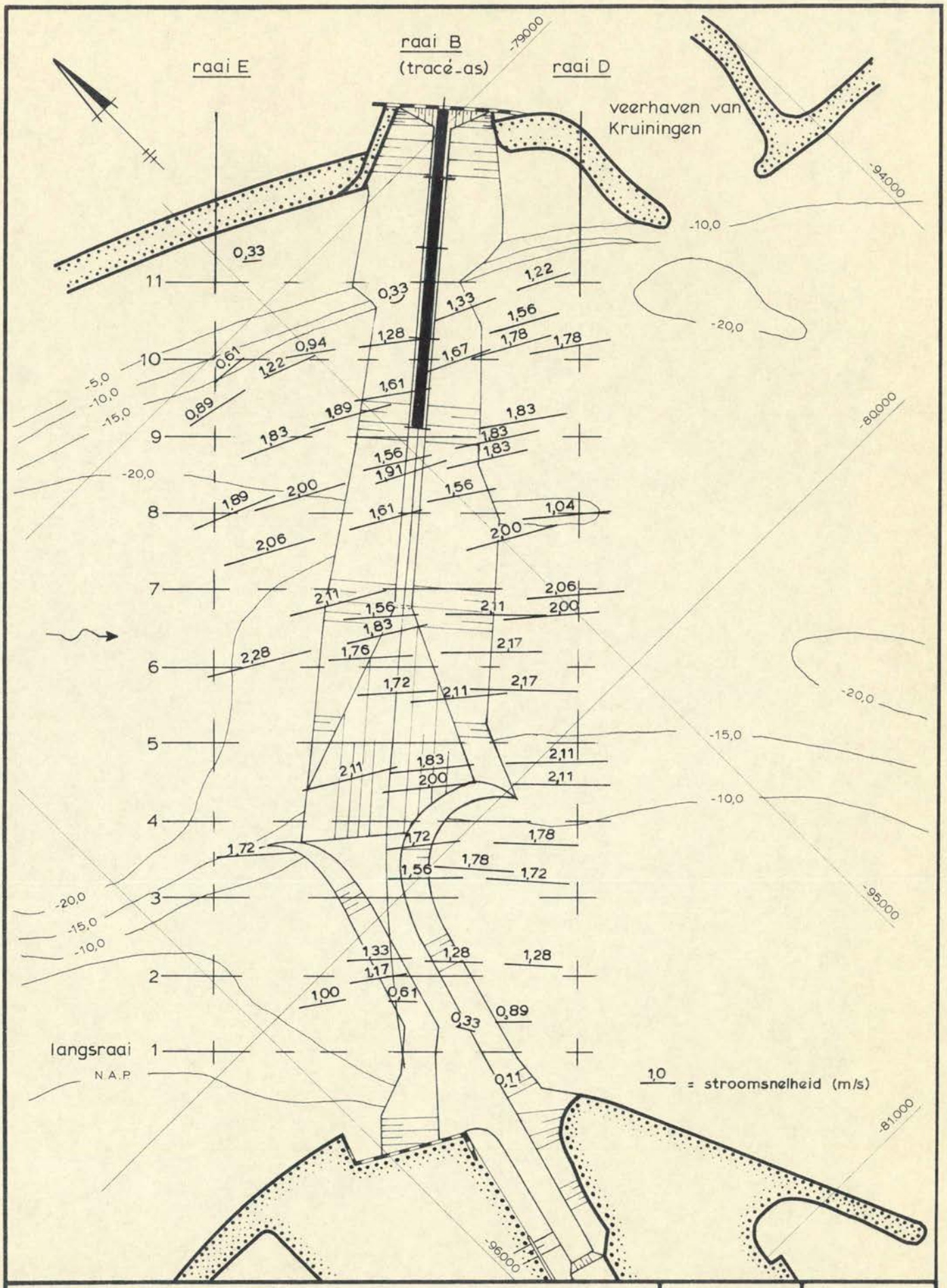
FIG. 40



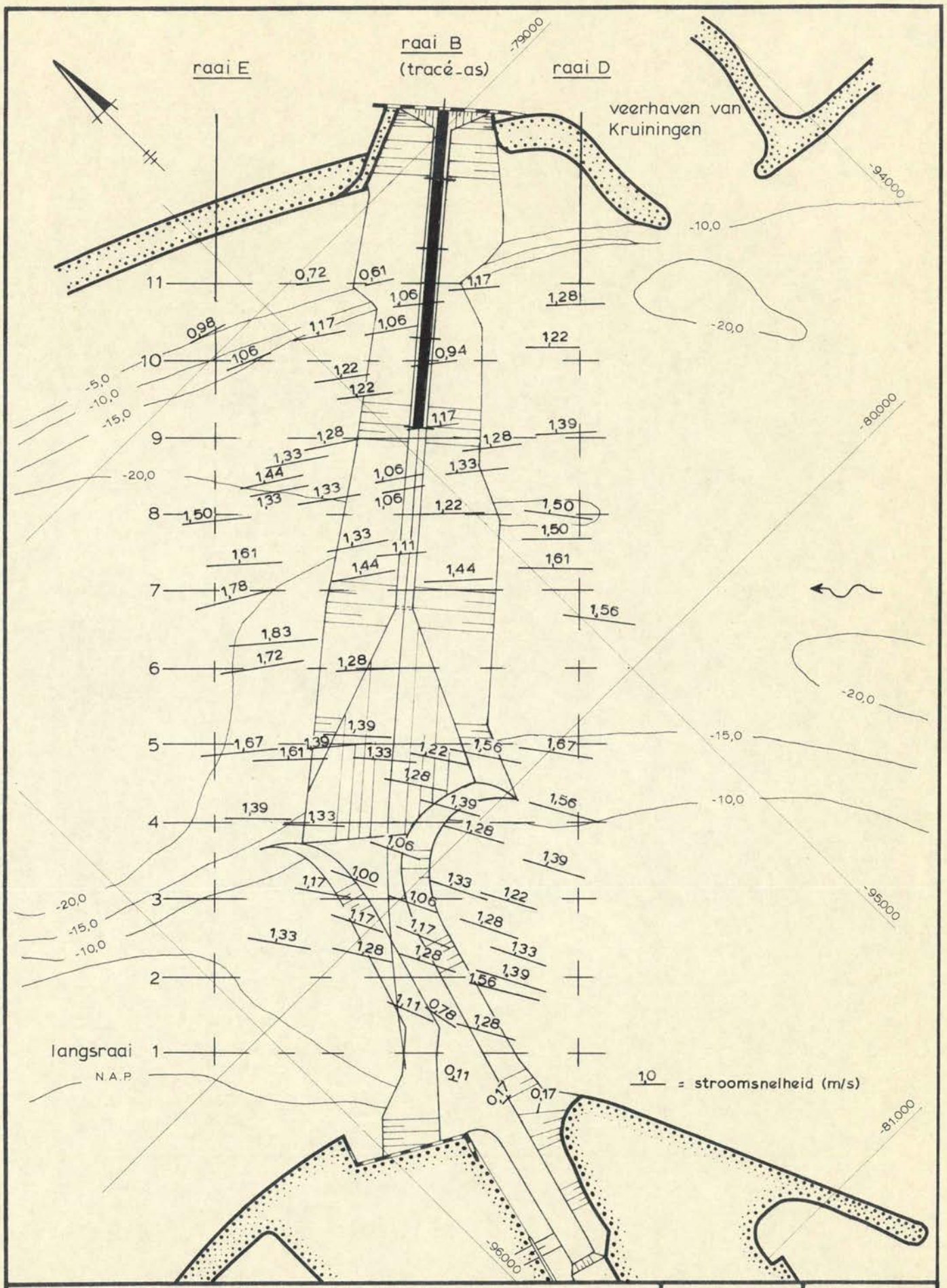
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T4	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 41



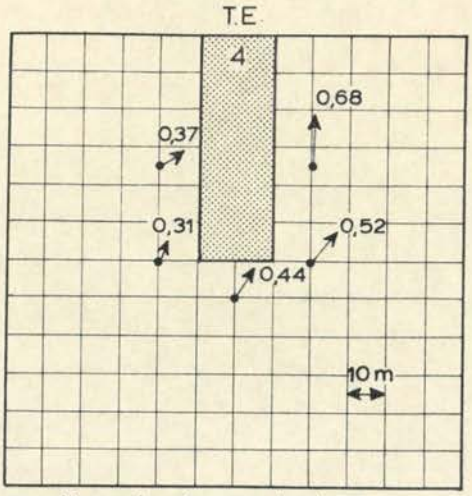
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T4	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 42



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T4	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 43

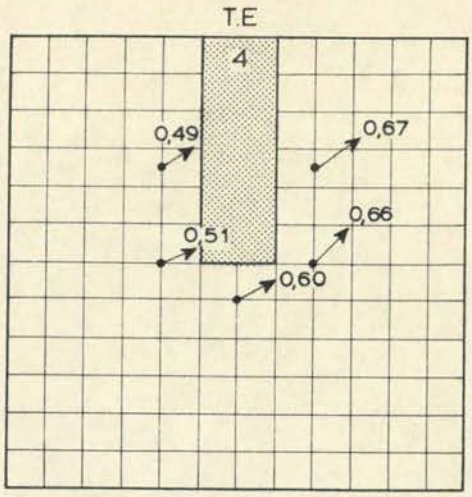


STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T4	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 44

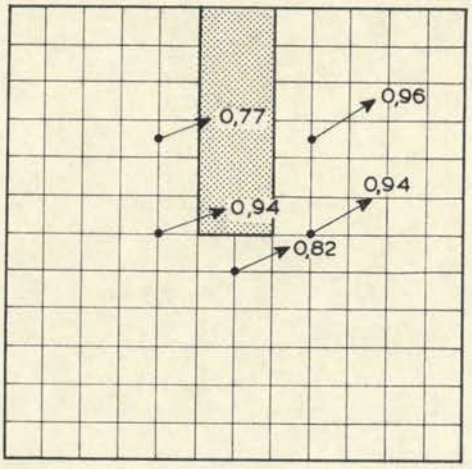


meethoogte boven bodem

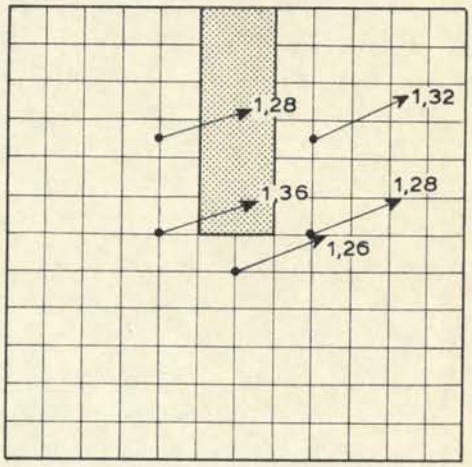
= 2,5 m



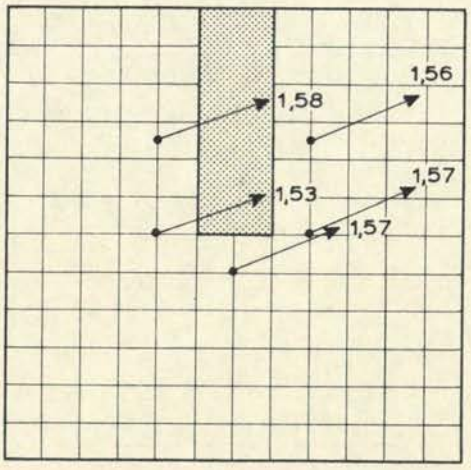
= 7,5 m



= 12,5 m

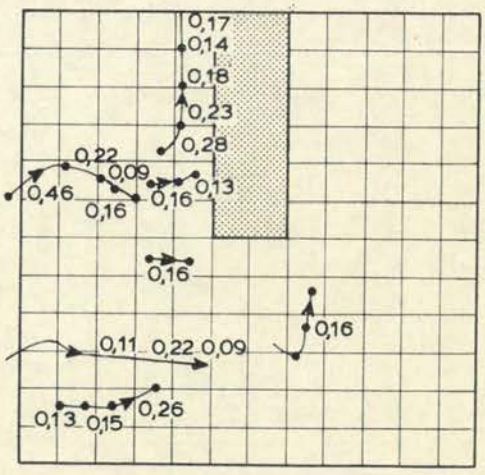


= 22,5 m



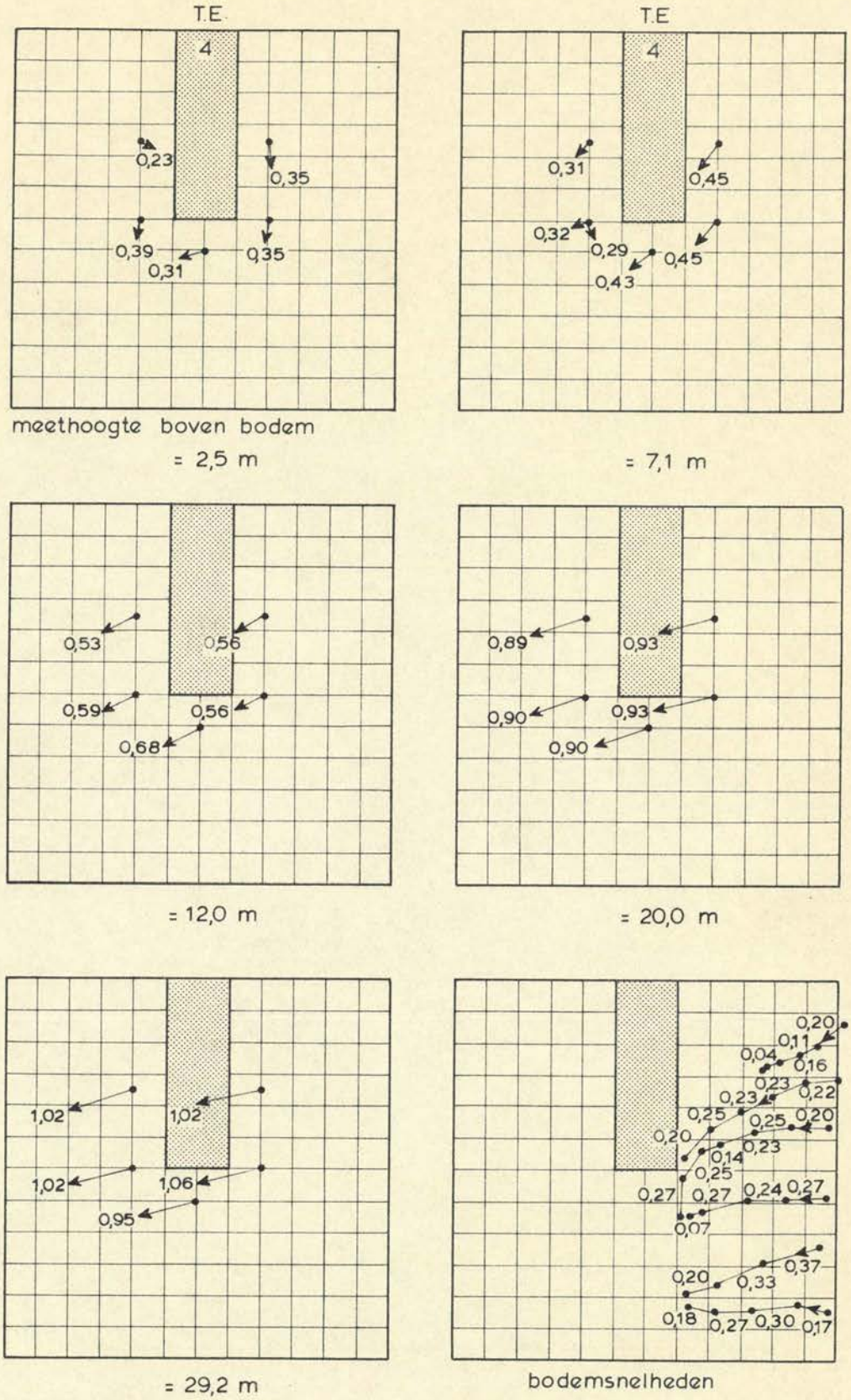
= 31,2 m

(tunneldak = 9,2 m boven bodem)



bodemsnelheden

STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T4	MAX. VLOED
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 45



meethoogte boven bodem

= 2,5 m

= 7,1 m

= 12,0 m

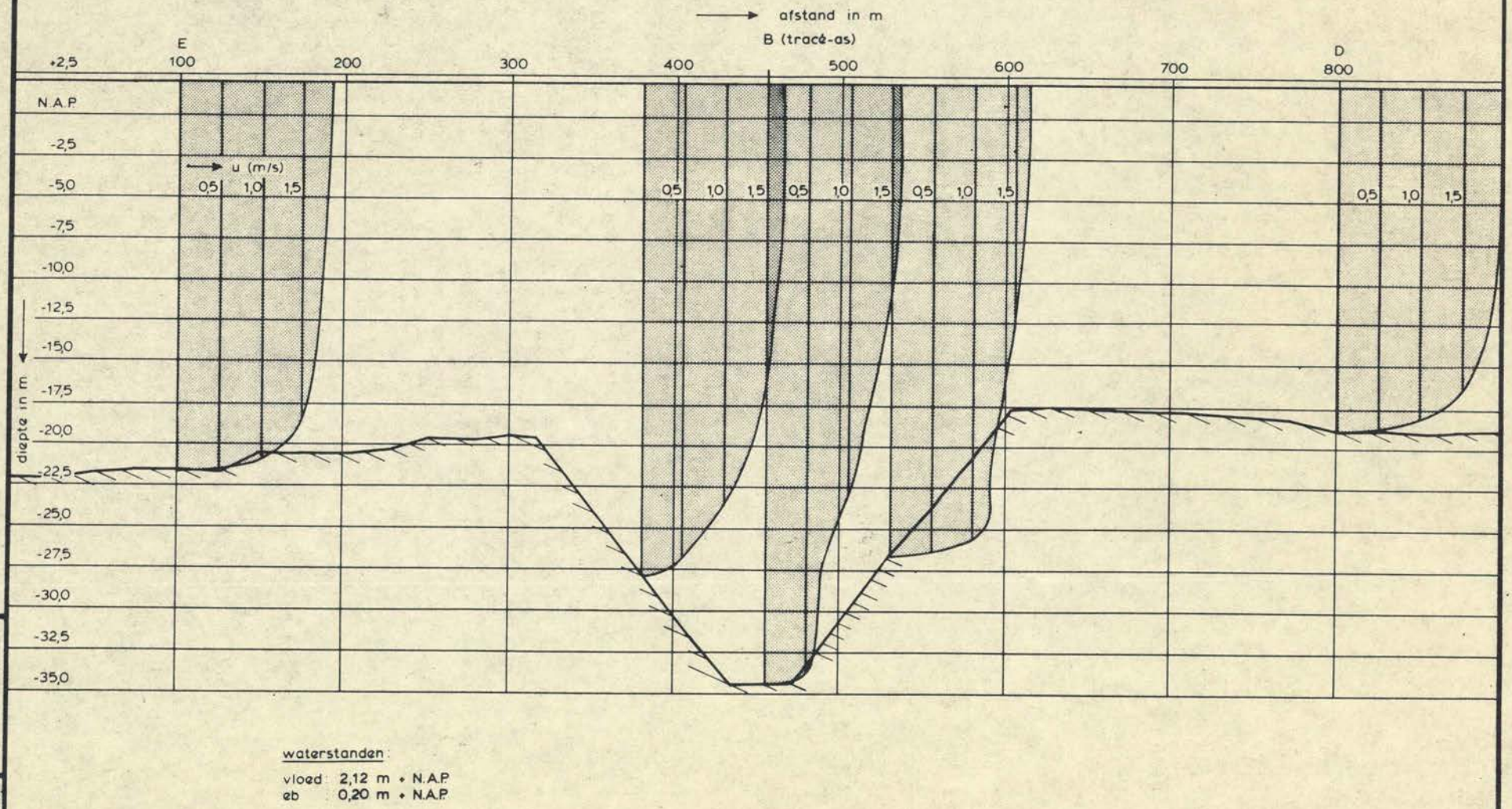
= 20,0 m

= 29,2 m

(tunneldak = 9,2 m boven bodem)

bodemsnelheden

STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T4	MAX. EB
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 46



STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 7

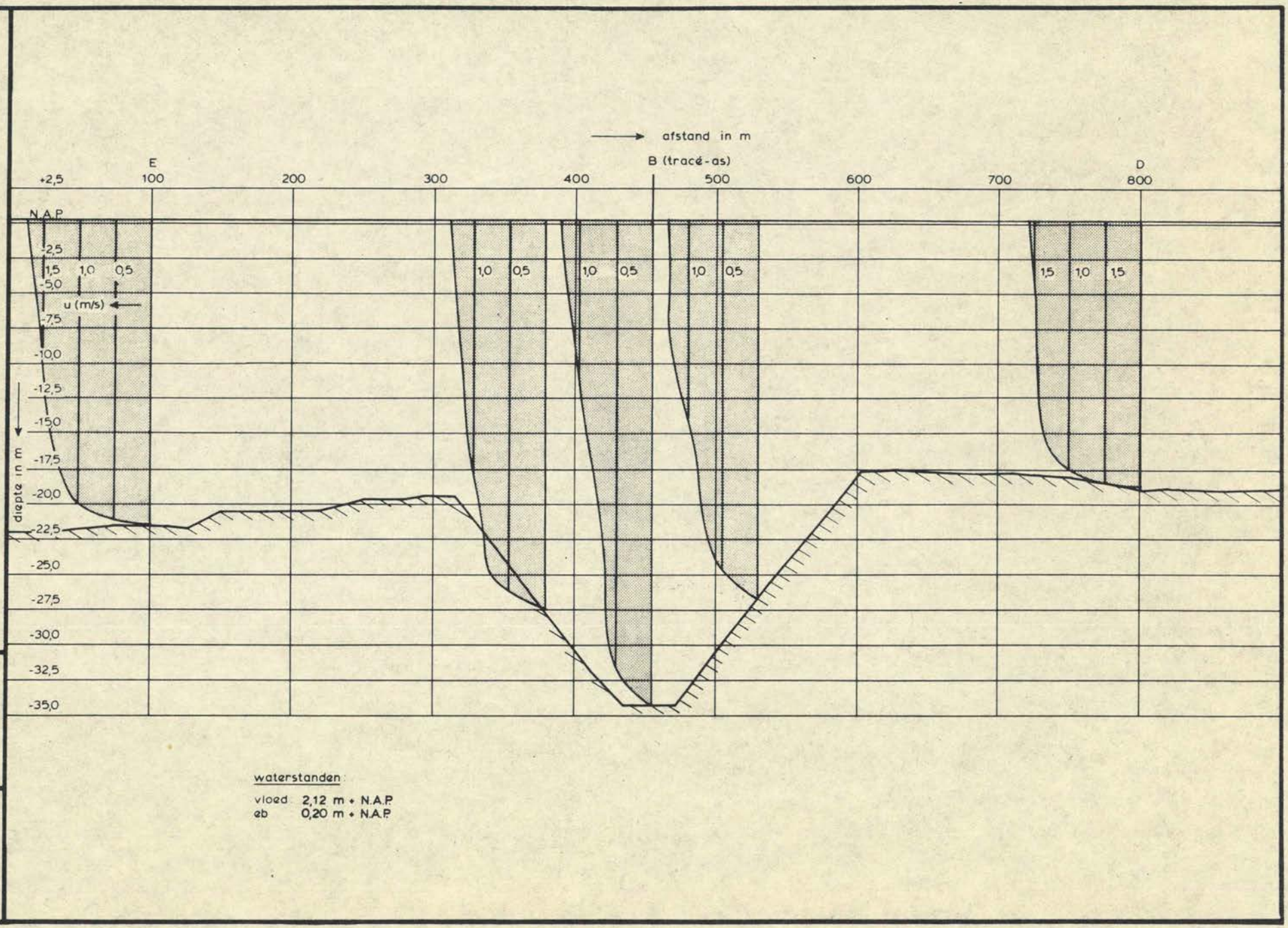
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T4

MAX. VLOED

M 1734

FIG. 47



STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 7

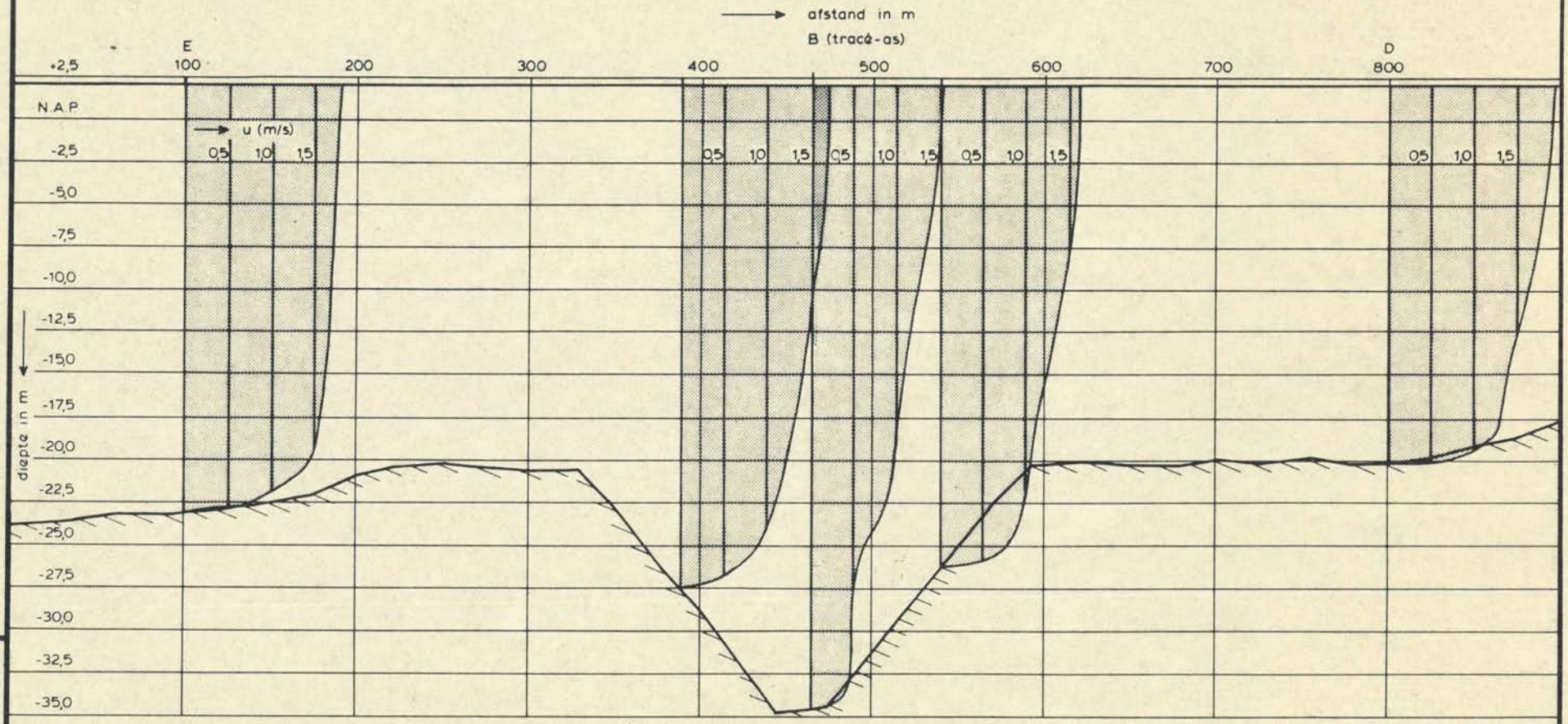
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T4

MAX. EB

M 1734

FIG. 48



waterstanden

vloed: 2,12 m + N.A.P.
eb: 0,20 m + N.A.P.

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 8

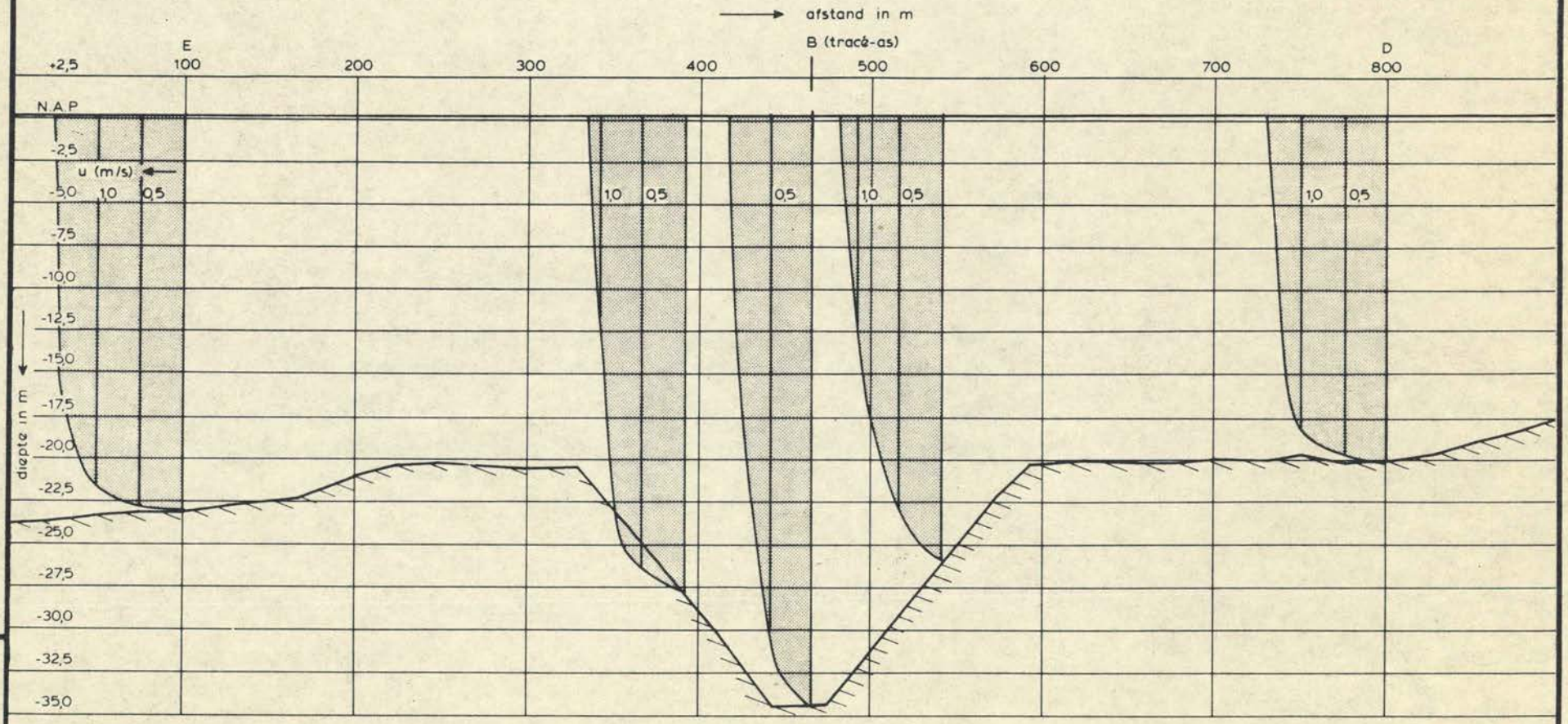
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T4

MAX. VLOED

M 1734

FIG. 49



waterstanden

vloed: 2,12 m + N.A.P
eb: 0,20 m + N.A.P

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 8

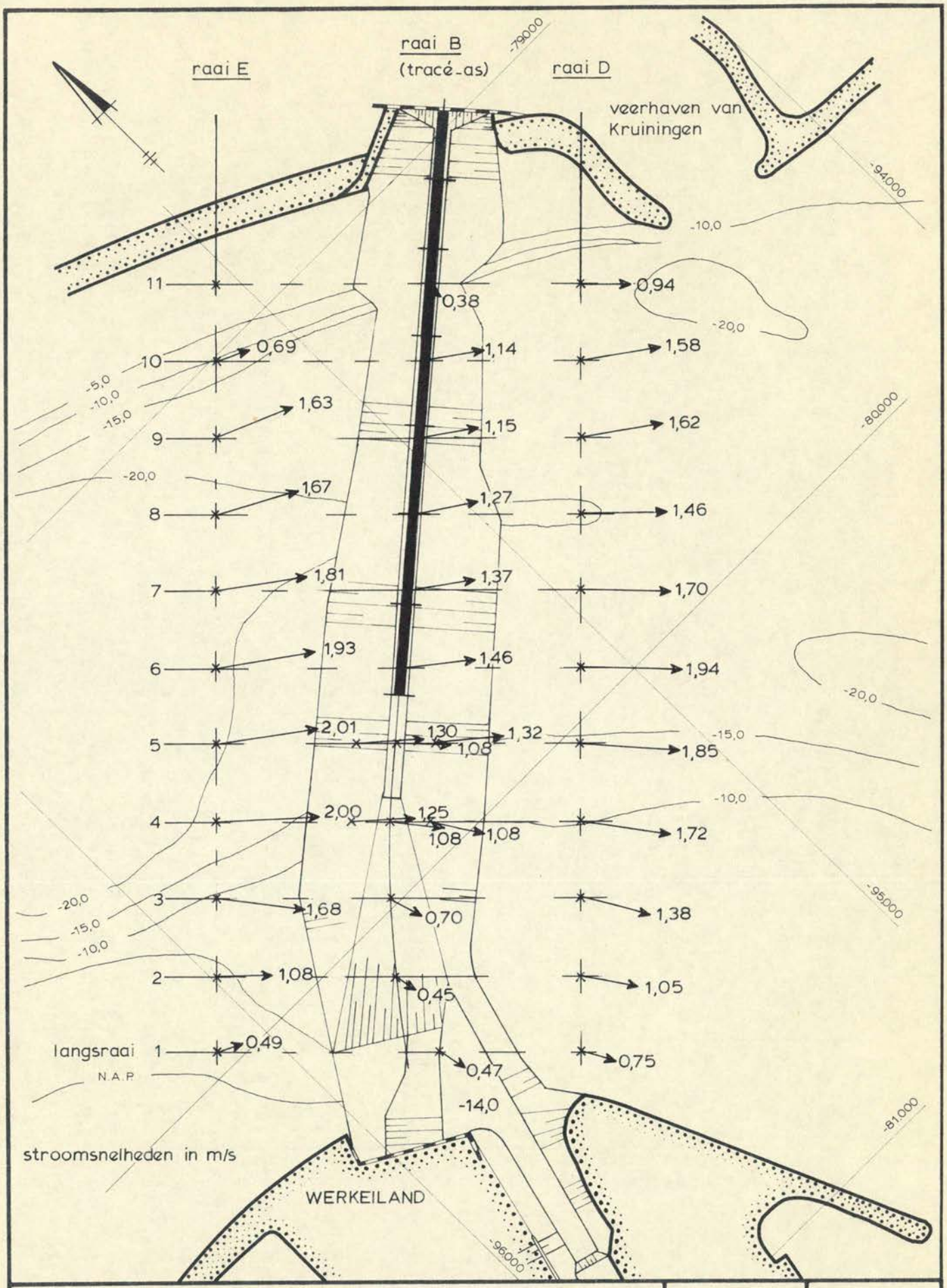
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T4

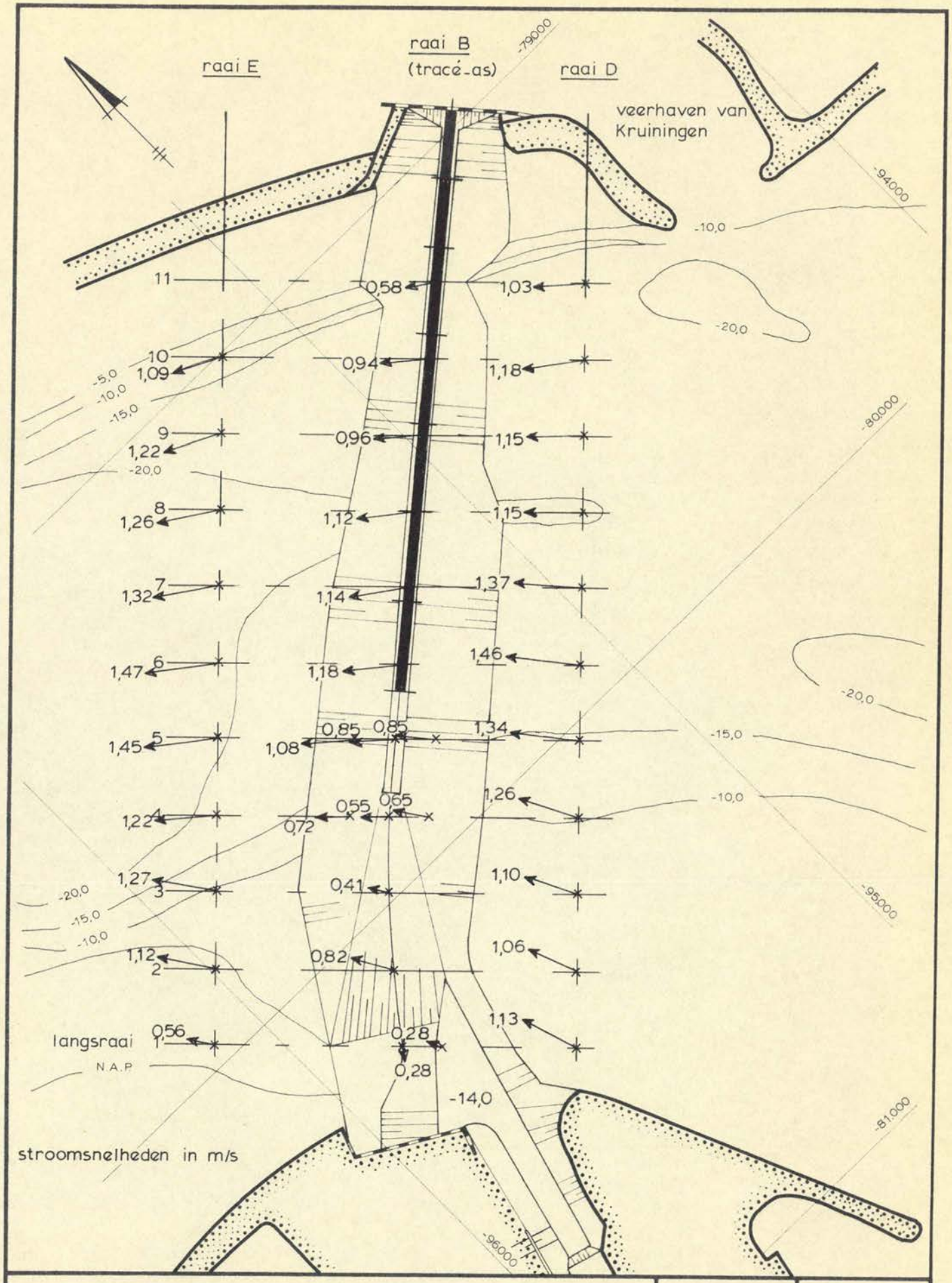
MAX. EB

M 1734

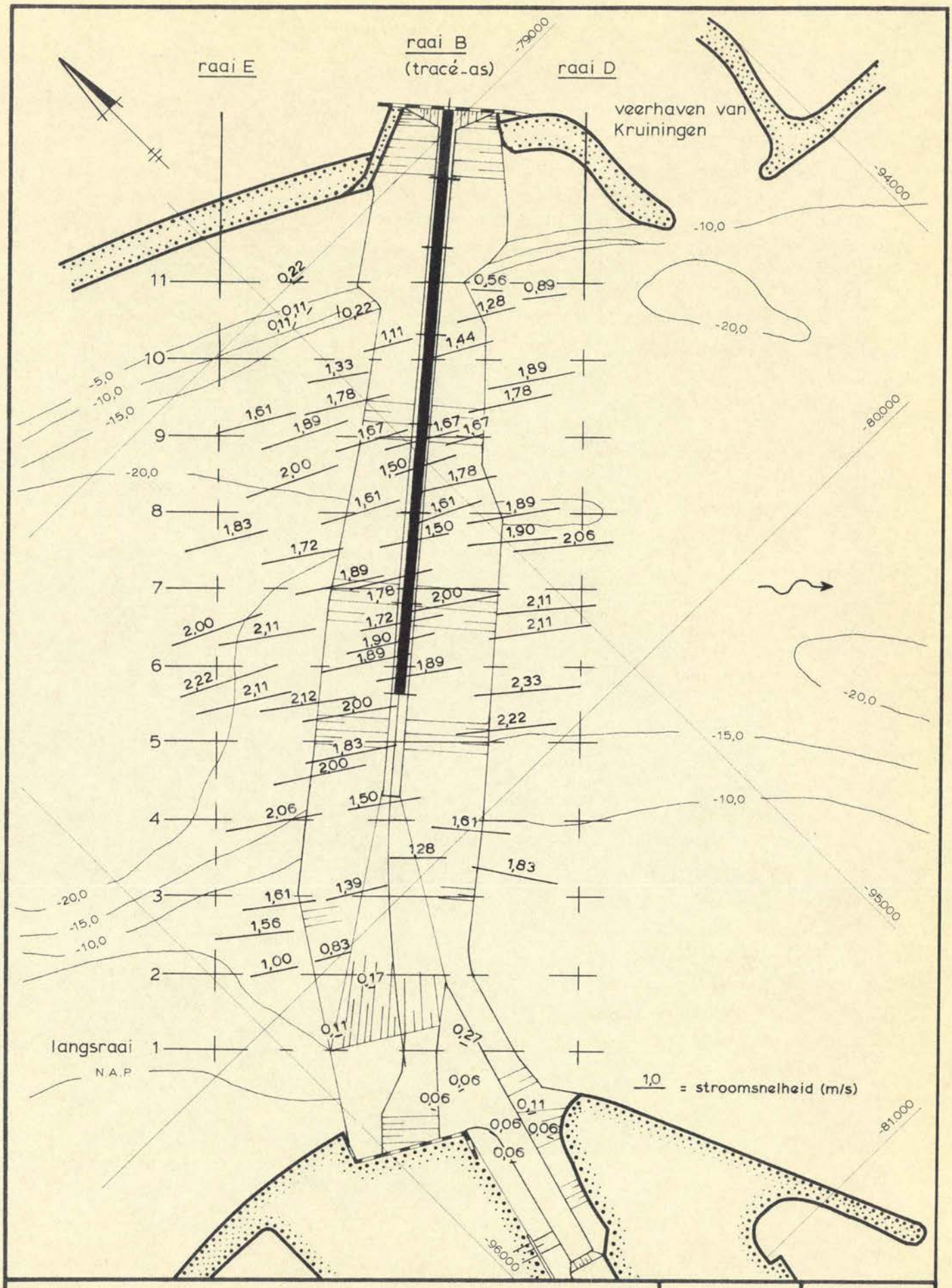
FIG. 50



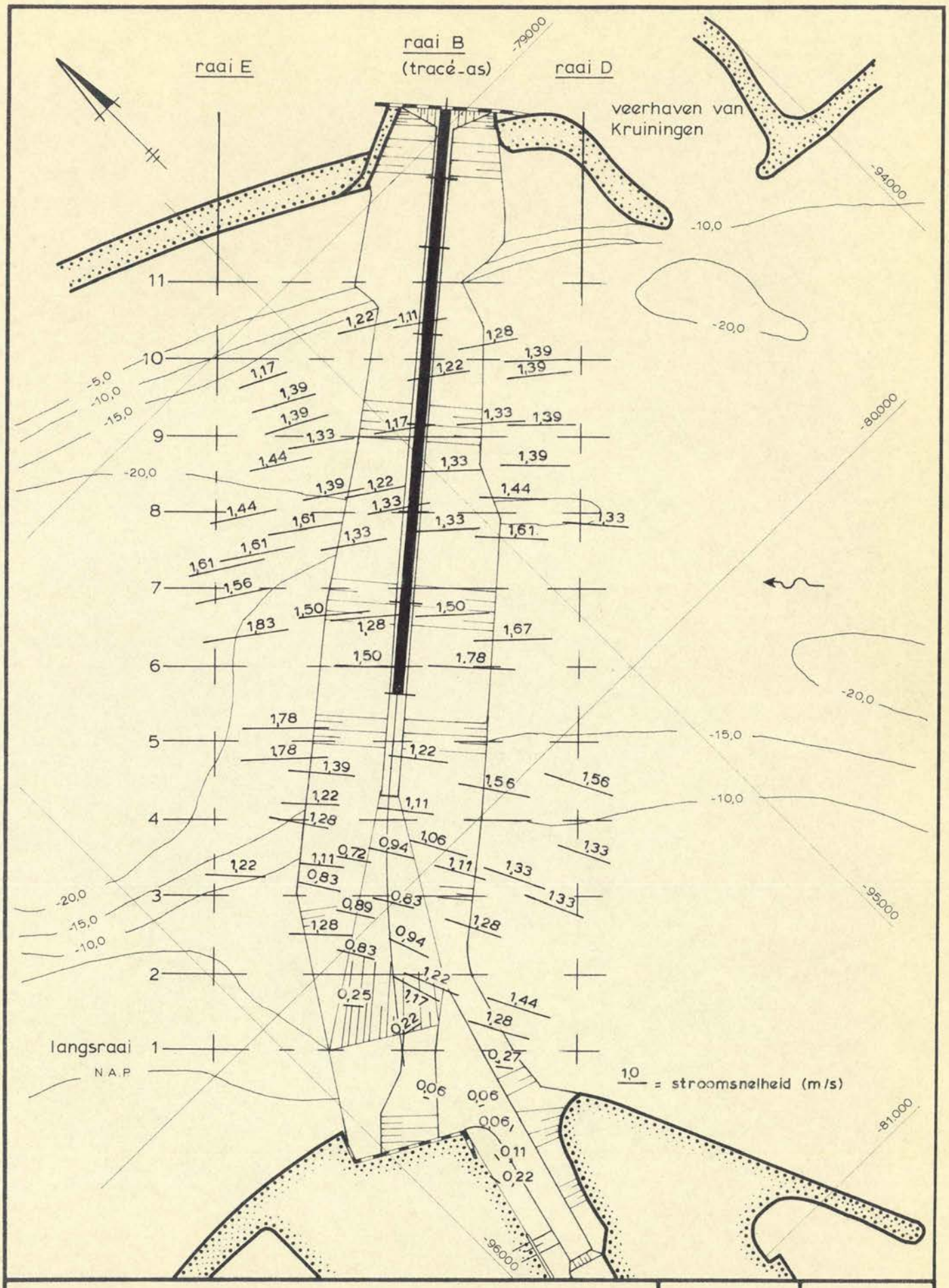
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T5	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 51



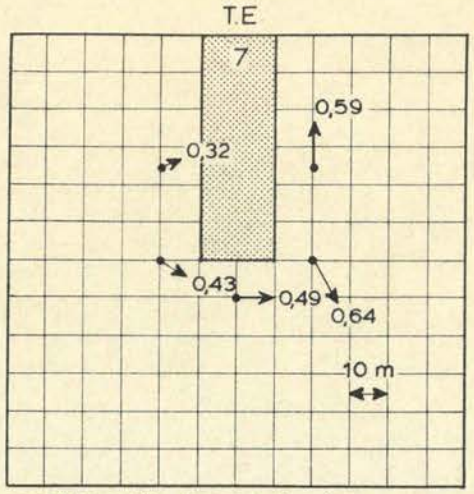
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T5	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 52



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T5	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 53

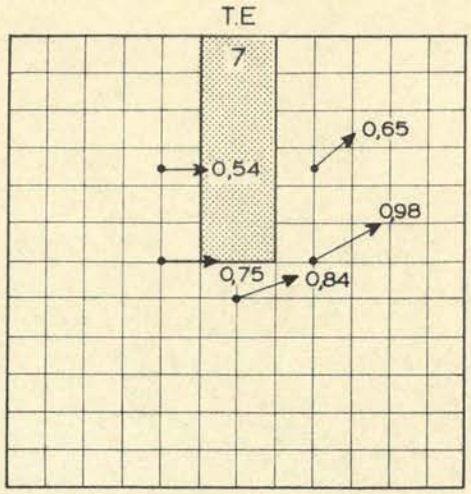


STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T5	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 54

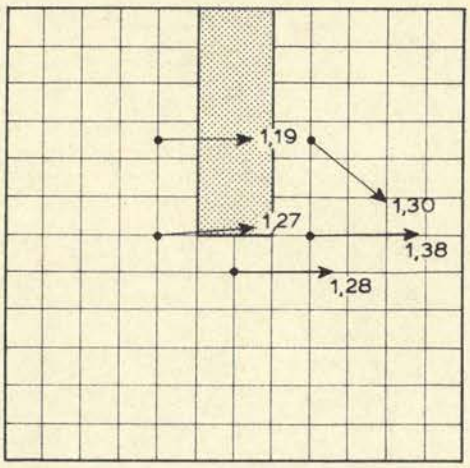


meethoogte boven bodem

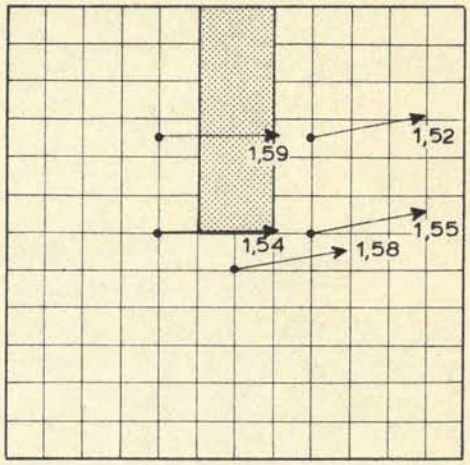
= 2,5 m



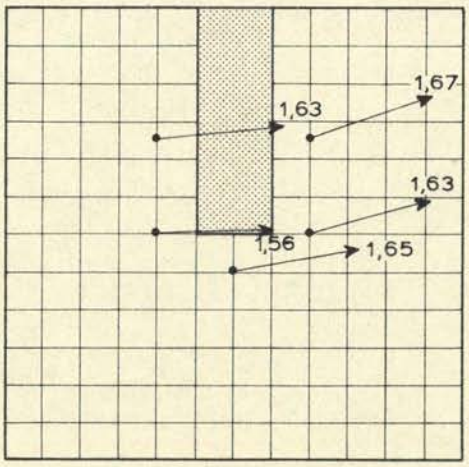
= 8,5 m



= 15,5 m

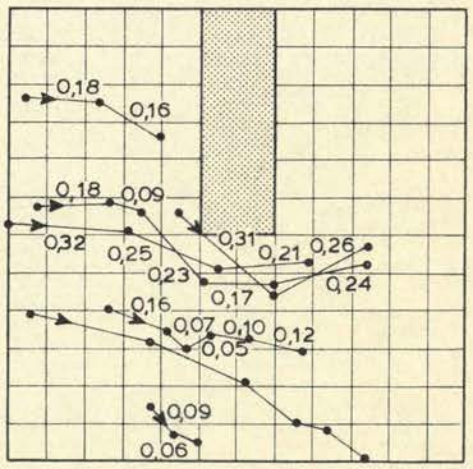


= 23,5 m



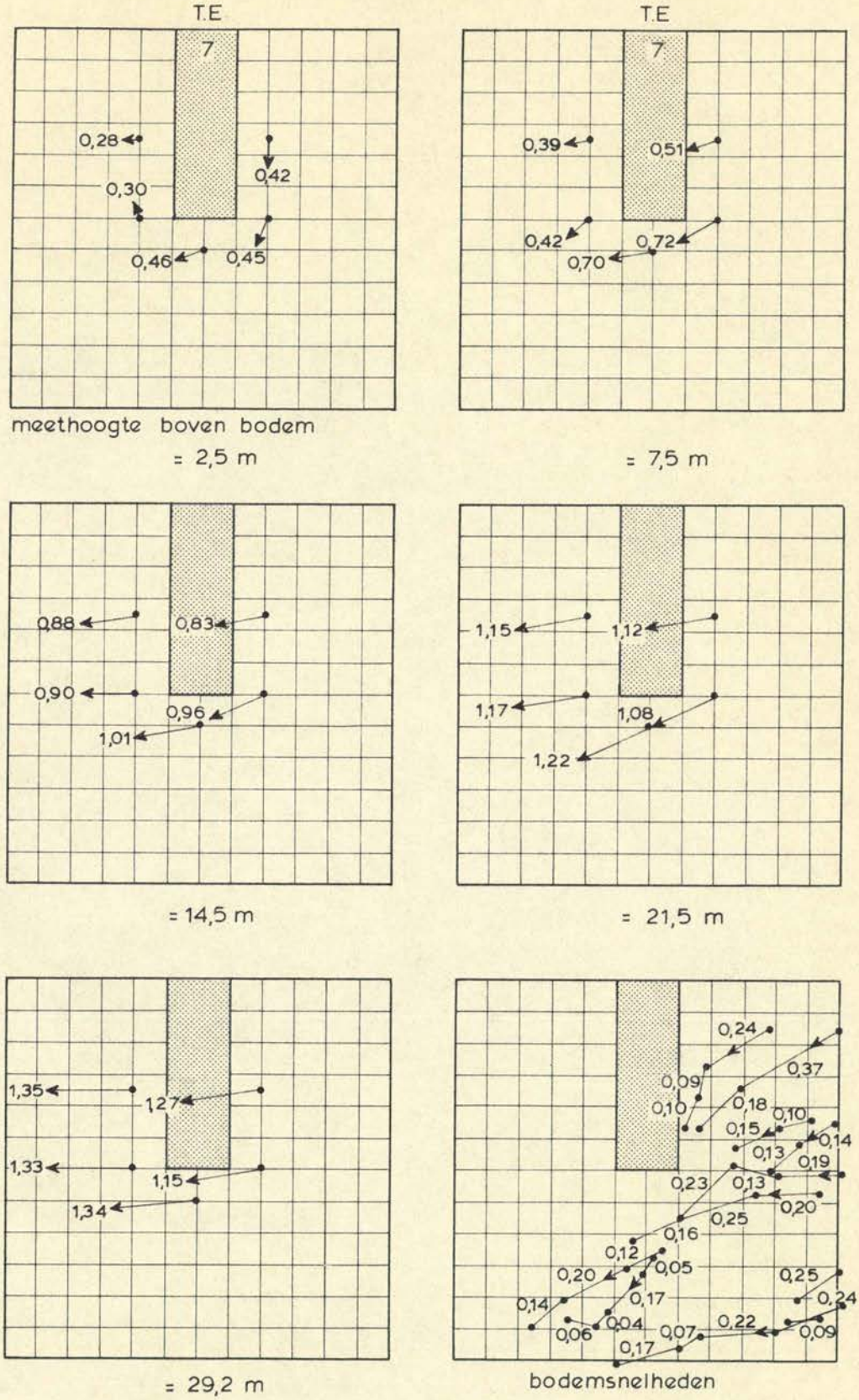
= 31,2 m

(tunneldak = 9,2 m boven bodem)

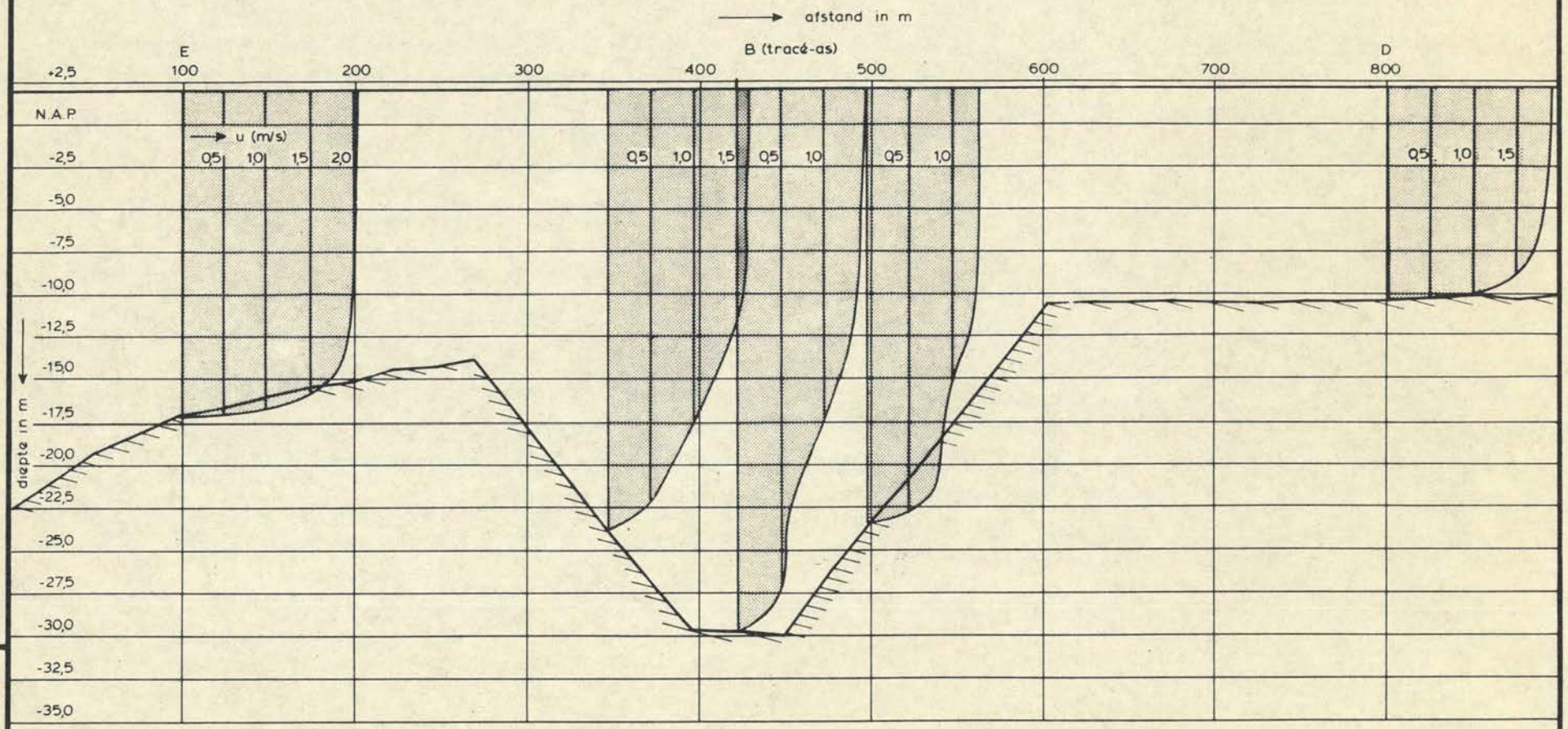


bodemsnelheden

STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T5	MAX. VLOED
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 55



STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T5	MAX. EB
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 56



waterstanden:

vloed: 2,12 m + N.A.P.
eb: 0,20 m + N.A.P.

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 4

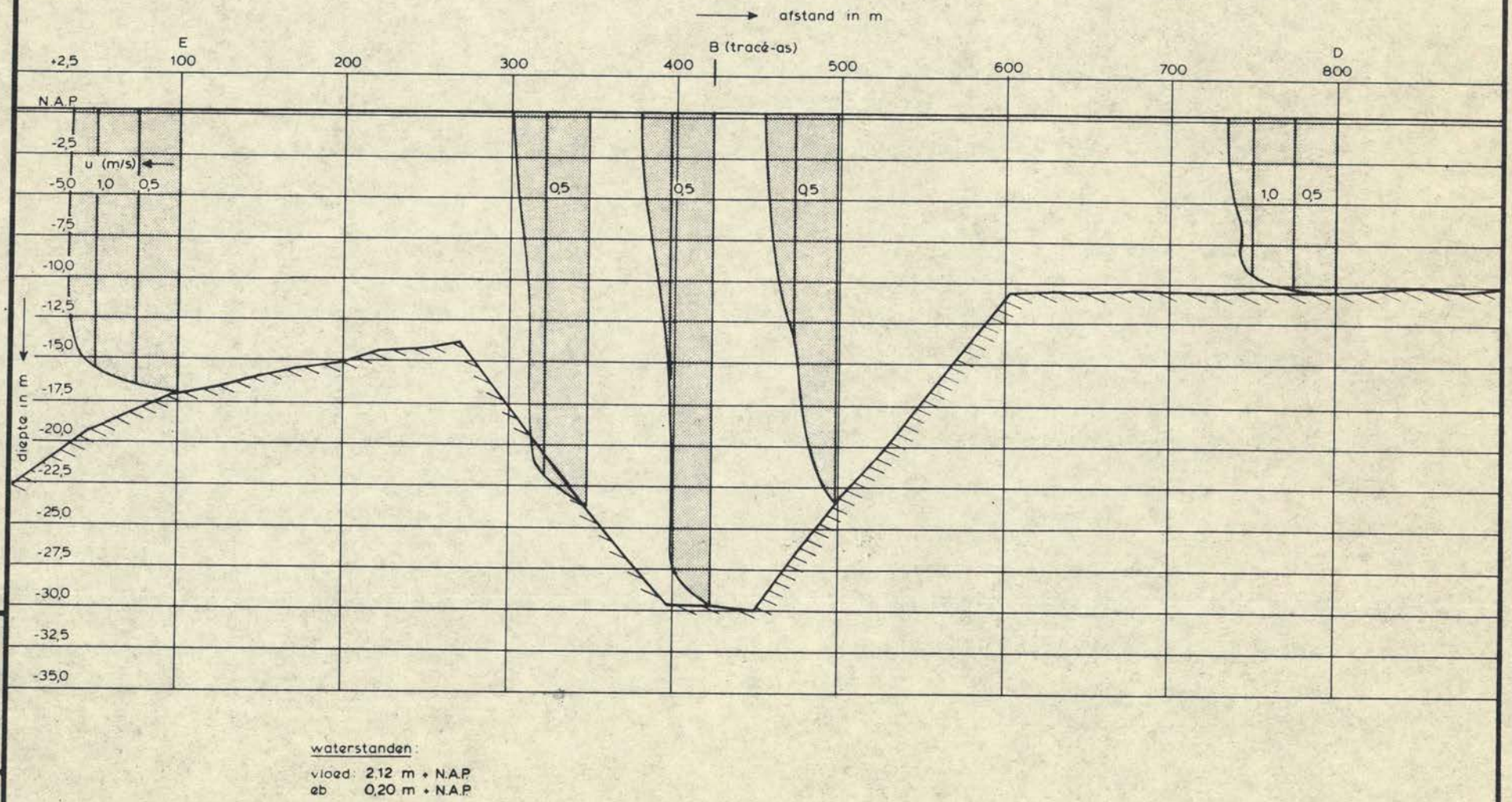
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 1734

T5

MAX. VLOED

FIG. 57



STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 4

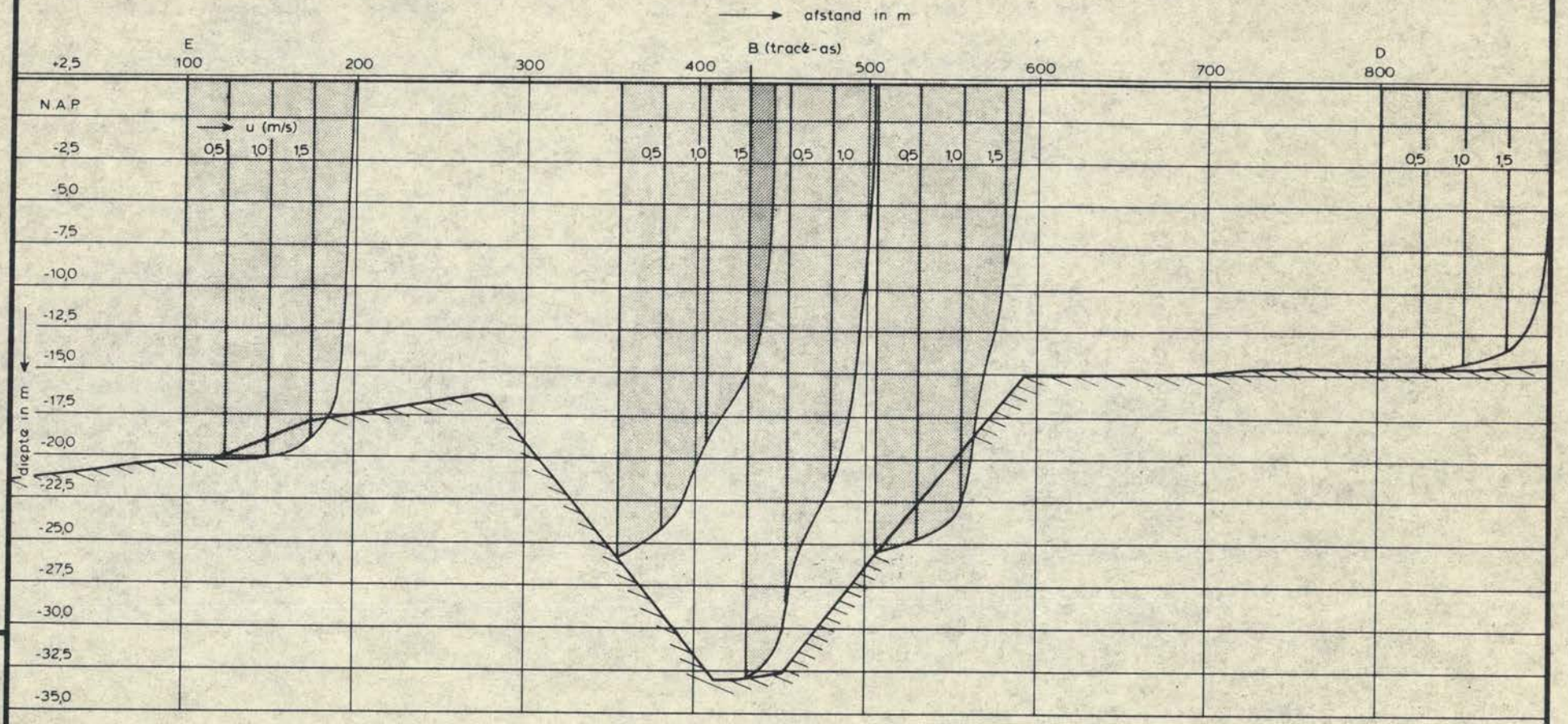
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T5

MAX. EB

M 1734

FIG. 58



waterstanden

vloed: 2,12 m + N.A.P.
eb 0,20 m + N.A.P.

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 5

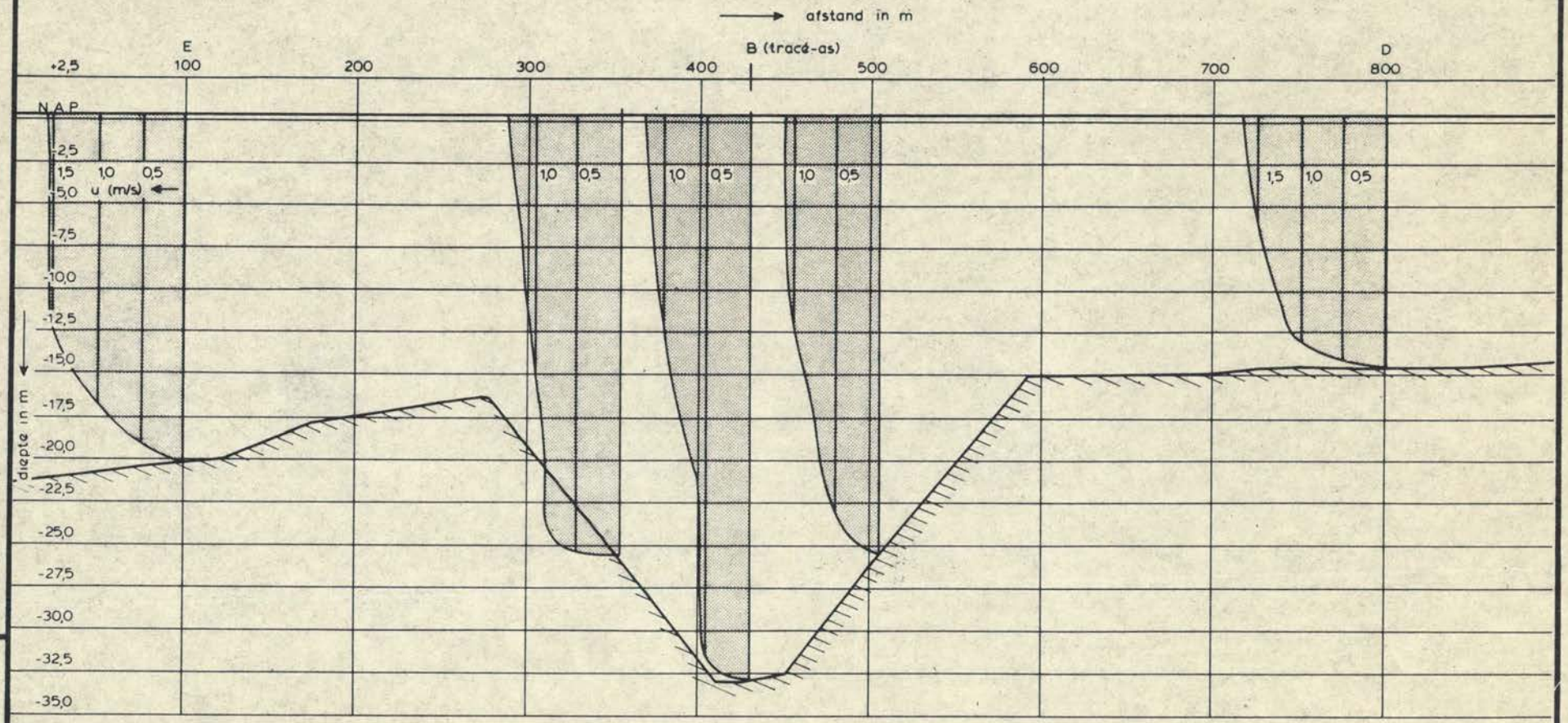
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T5

MAX. VLOED

M 1734

FIG. 59



STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 5

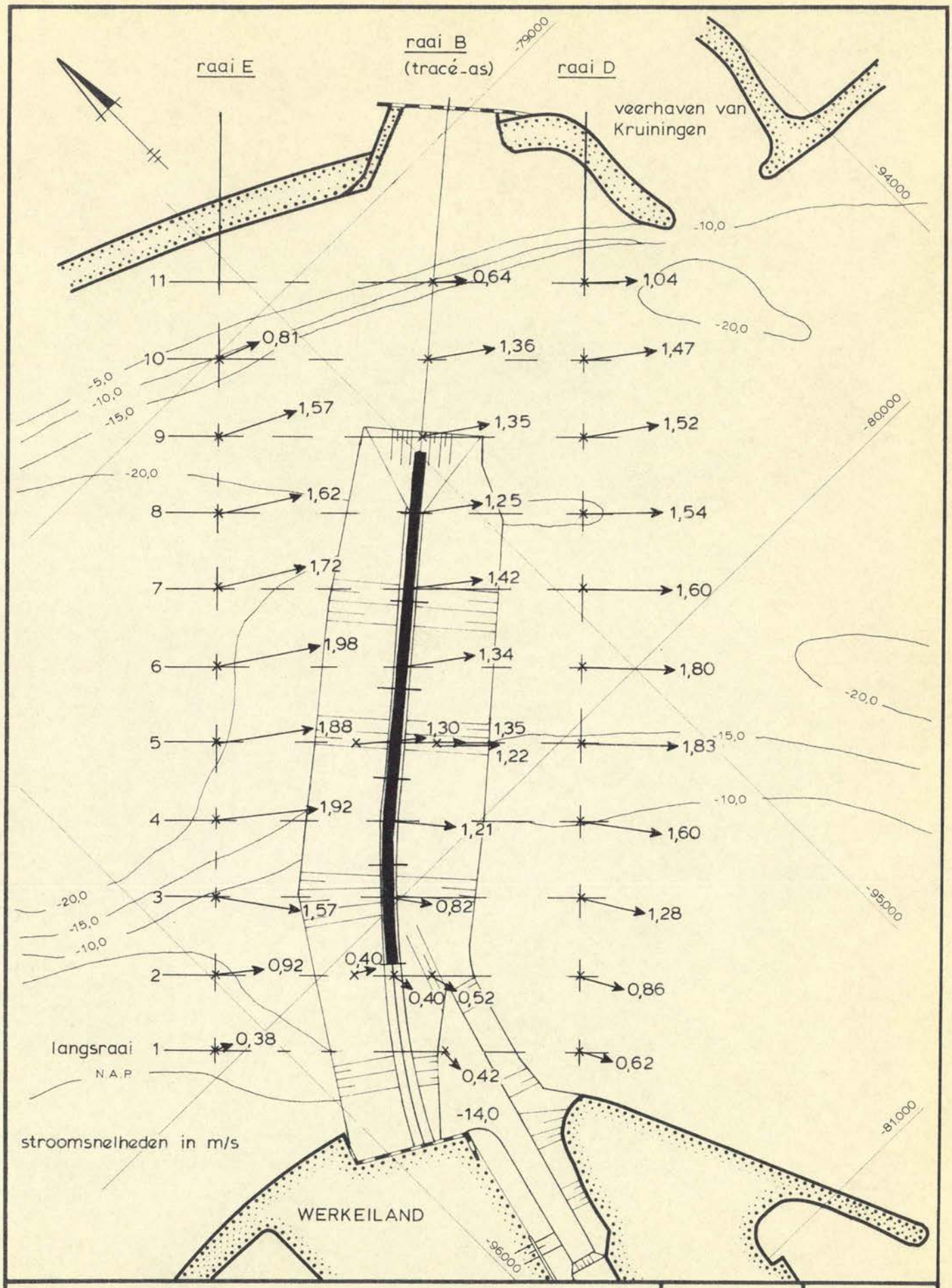
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T5

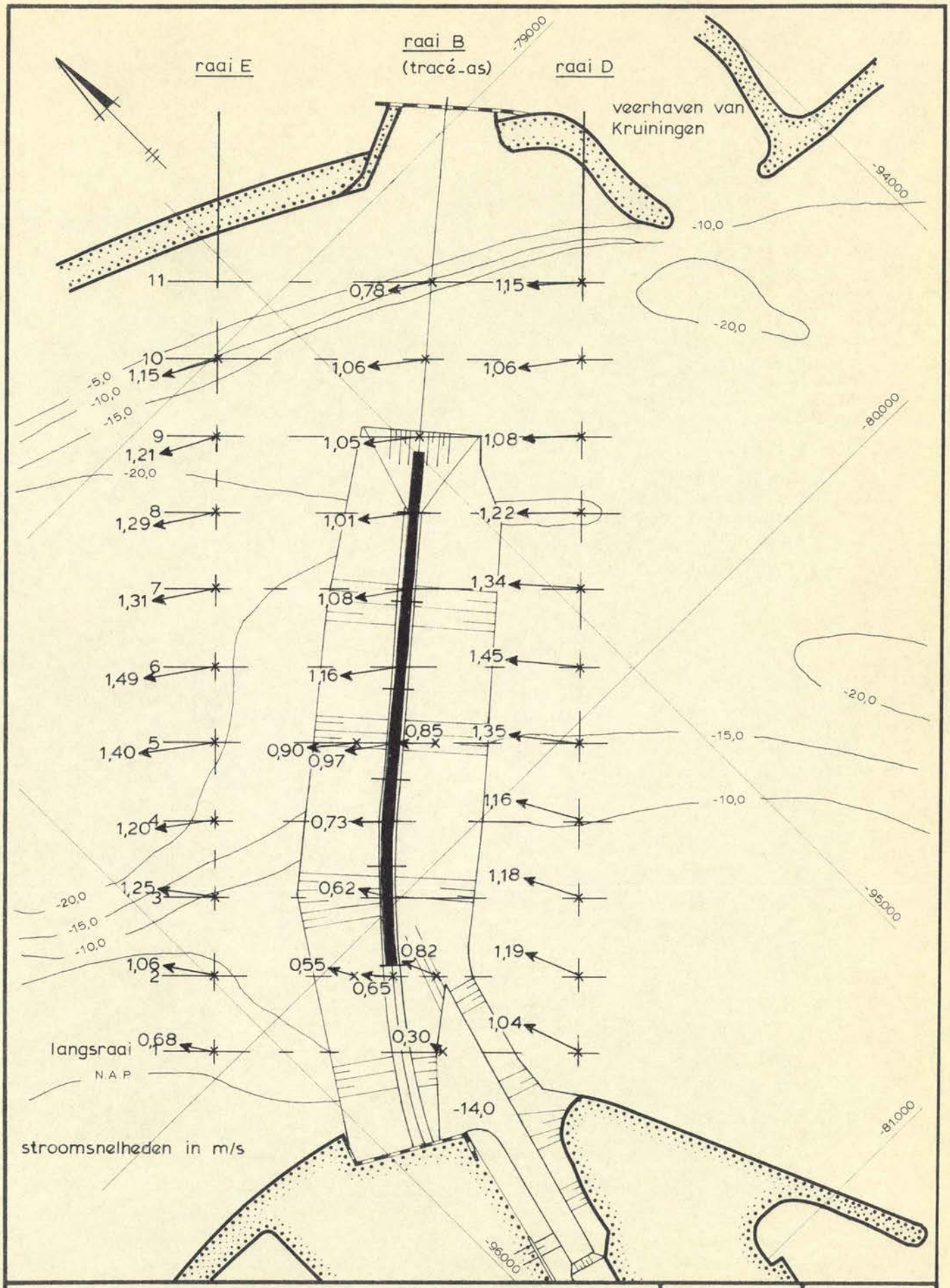
MAX. EB

M 1734

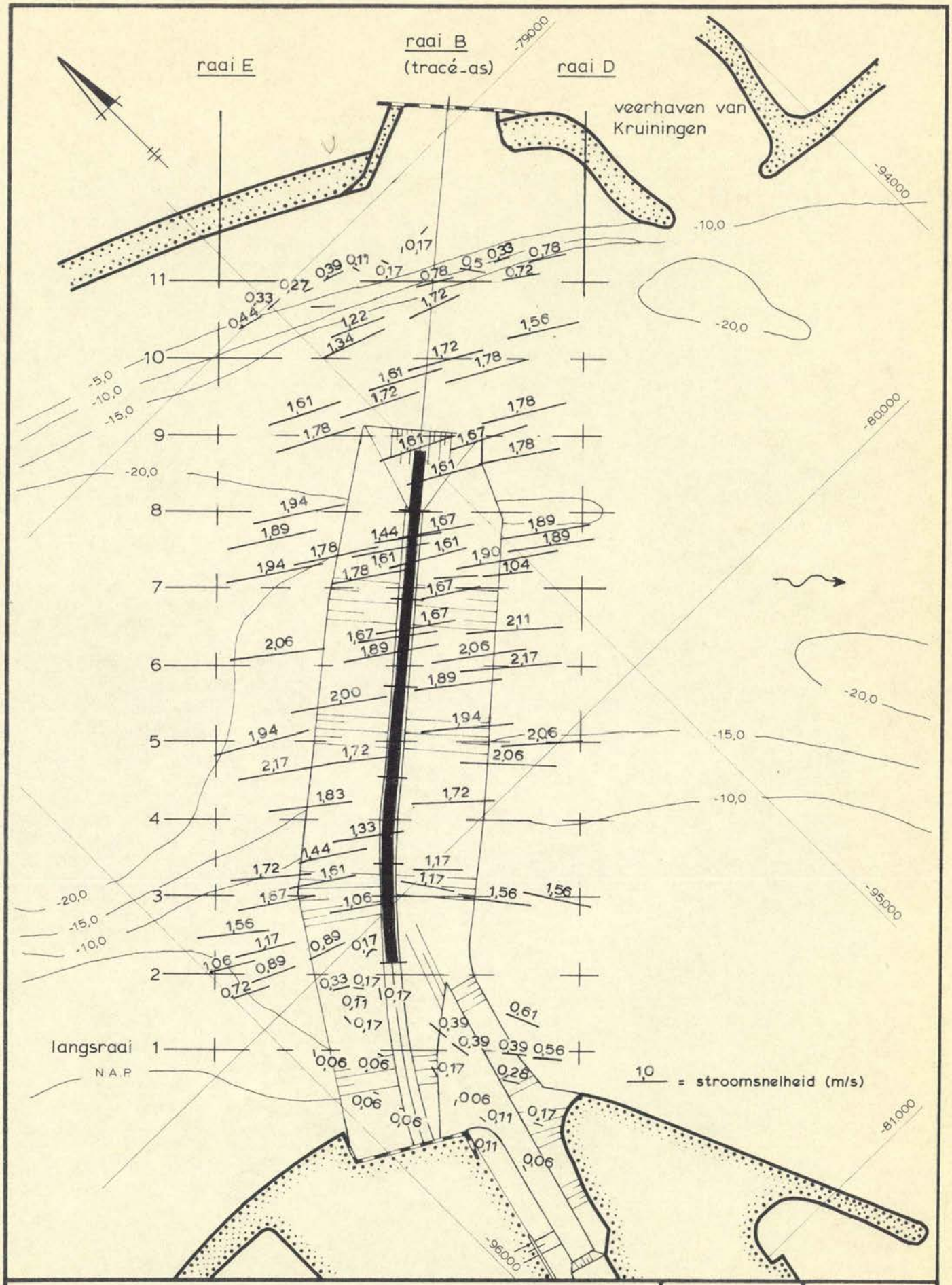
FIG. 60



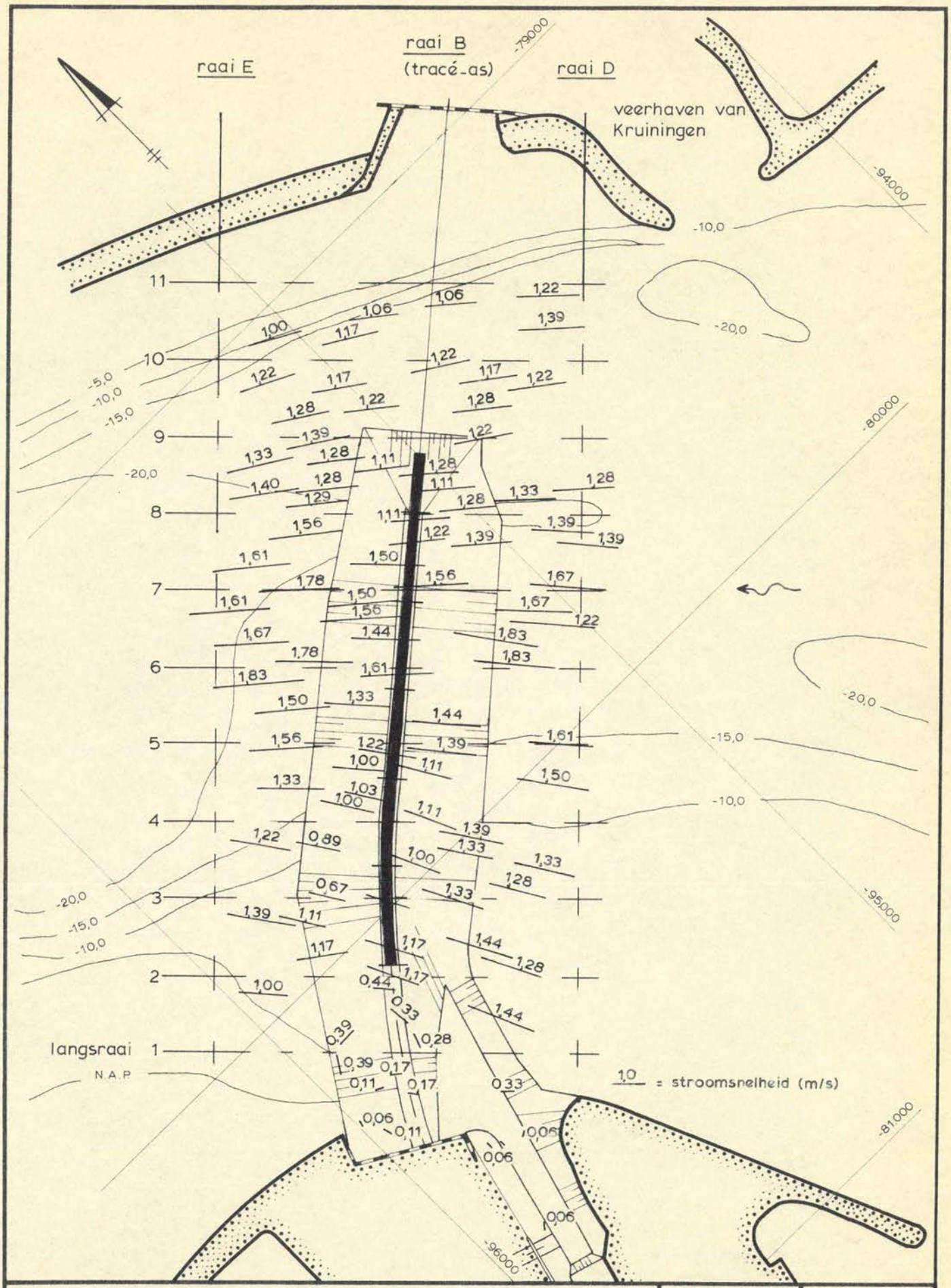
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T6	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 61



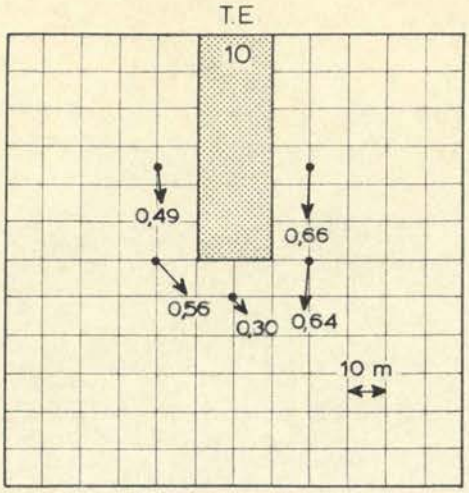
GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN	T6	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 62



STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T6	MAX. VLOED
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 63

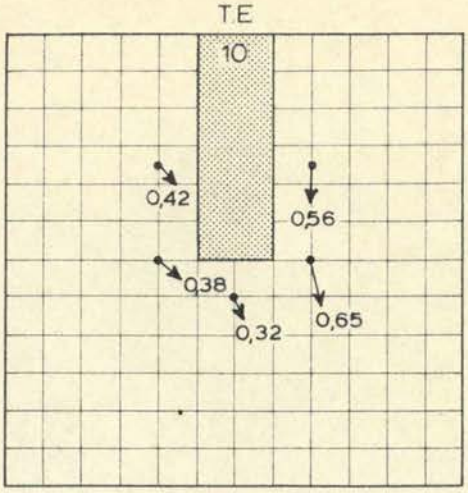


STROOMRICHTINGEN VOLGENS DRIJVERBANEN	T6	MAX. EB
	SCHAAL 1 : 10.000	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 64

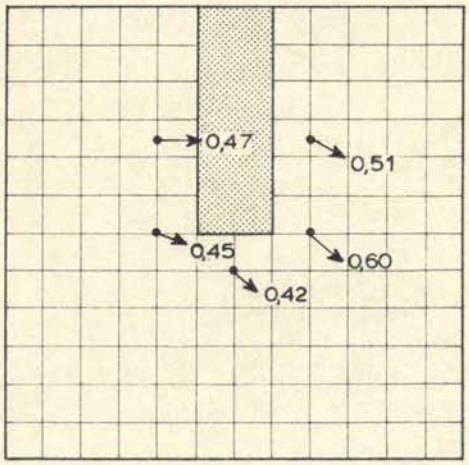


meethoogte boven bodem

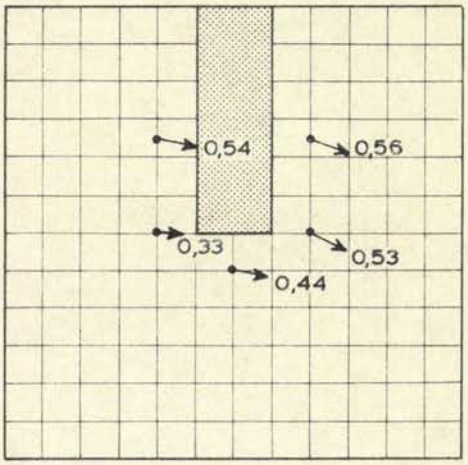
= 2,5 m



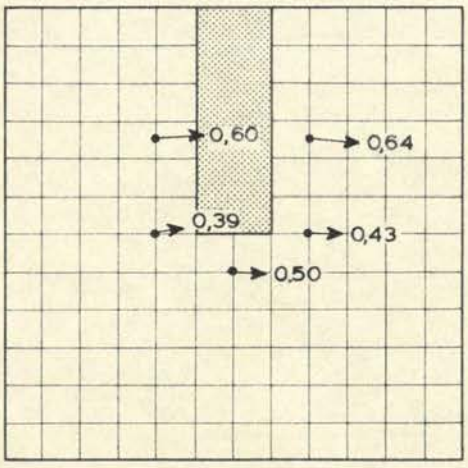
= 7,0 m



= 12,5 m

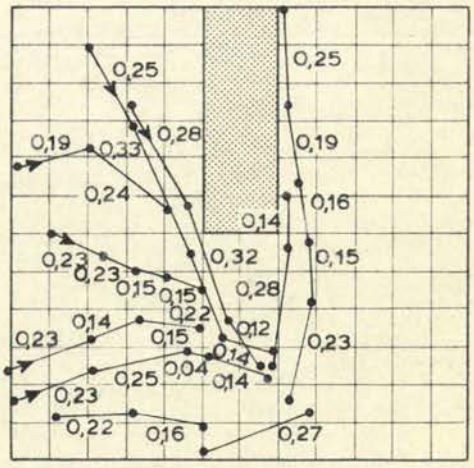


= 17,5 m



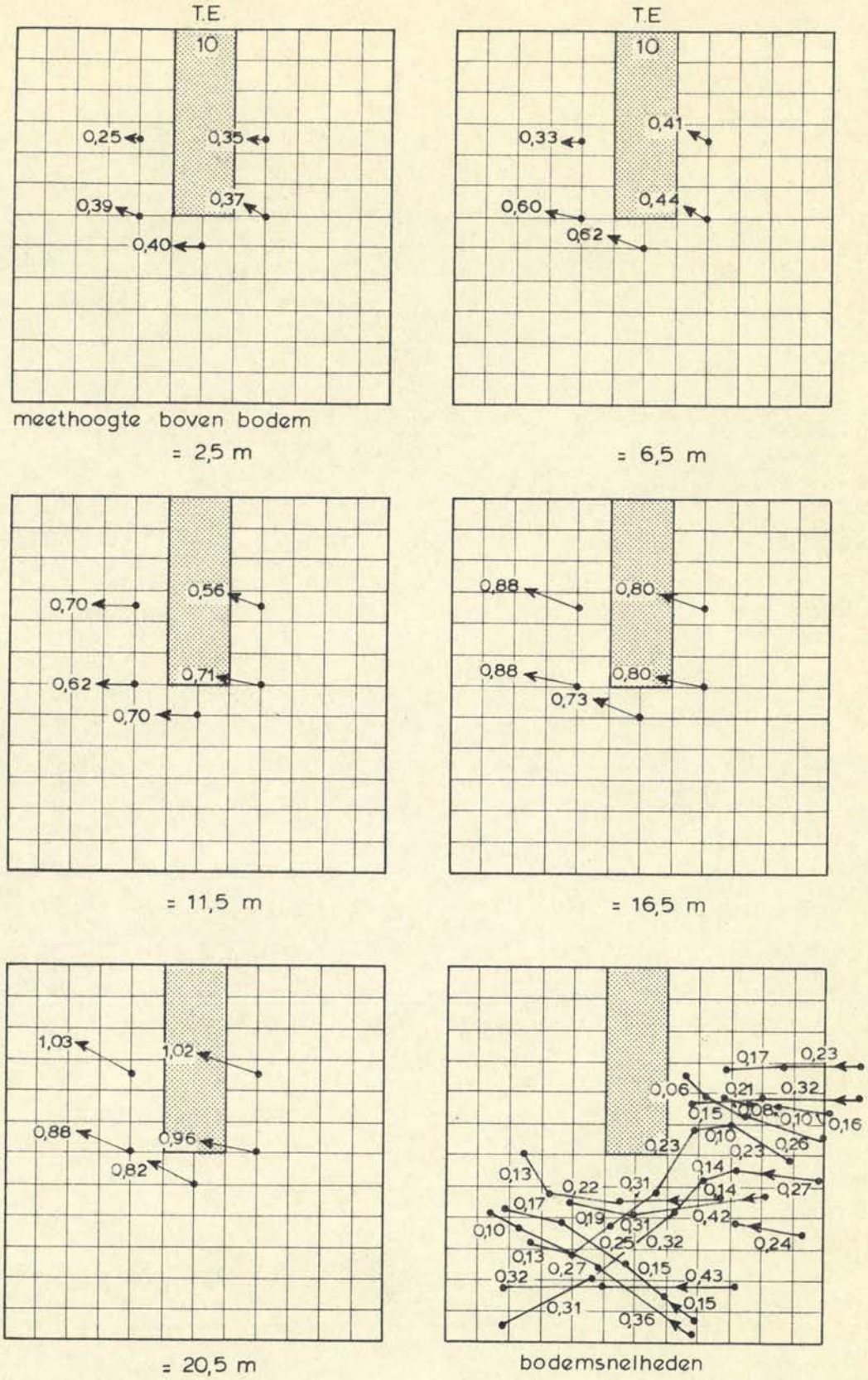
= 22,5 m

(tunneldak = 9,2 m boven bodem)

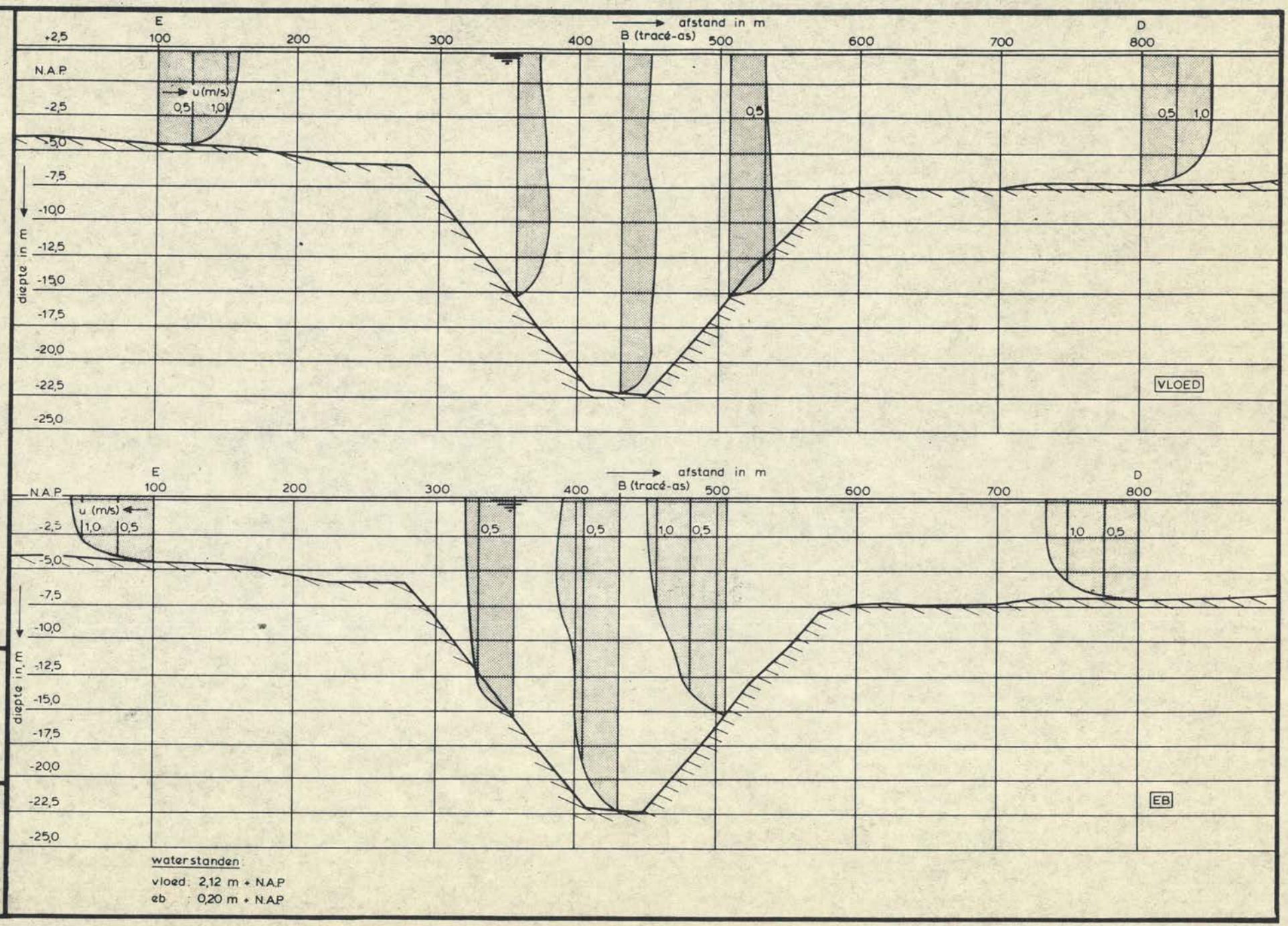


bodemsnelheden

STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T6	MAX. VLOED
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 65



STROOMSNELHEDEN EN STROOMRICHTINGEN TER PLAATSE VAN TUNNELEIND	T6	MAX. EB
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M 1734	FIG. 66



WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

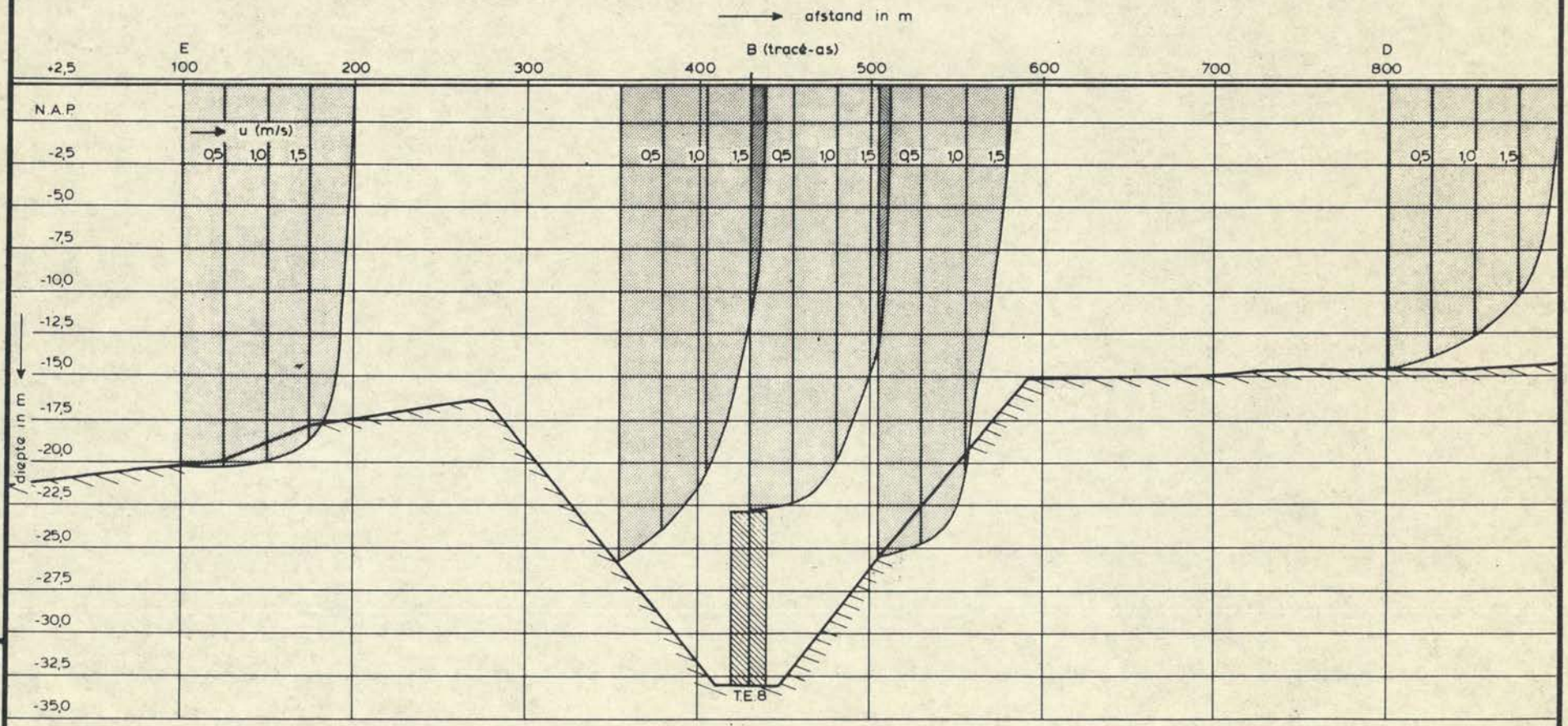
STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 2

T6

MAX. VLOED/
MAX. EB

M 1734

FIG. 67



waterstanden:

vloed: 2,12 m + N.A.P.
eb : 0,20 m + N.A.P.

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 5

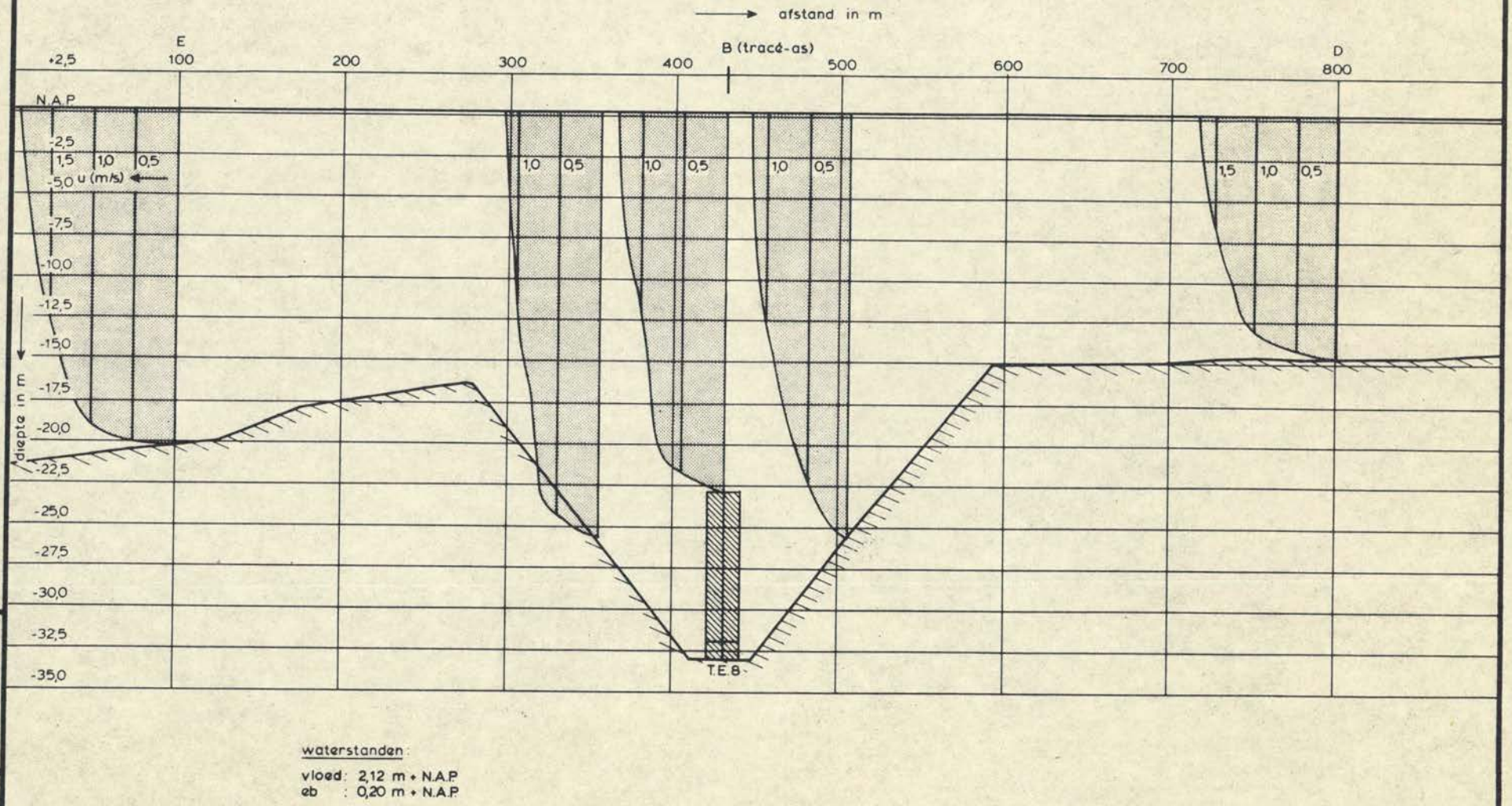
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T6

MAX. VLOED

M 1734

FIG. 68



waterstanden:

vloed: 2,12 m + N.A.P
eb : 0,20 m + N.A.P

STROOMSNELHEIDSVERTIKALEN IN LANGSRAAI 5

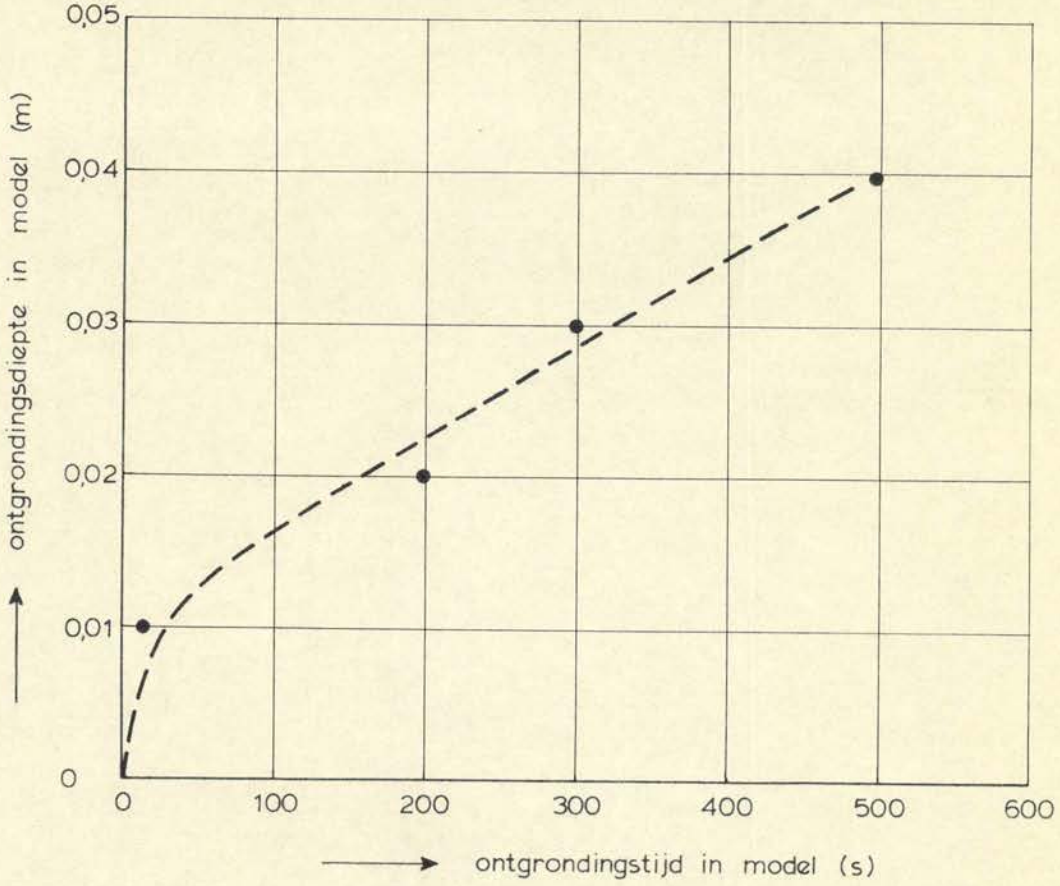
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

T6

MAX. EB

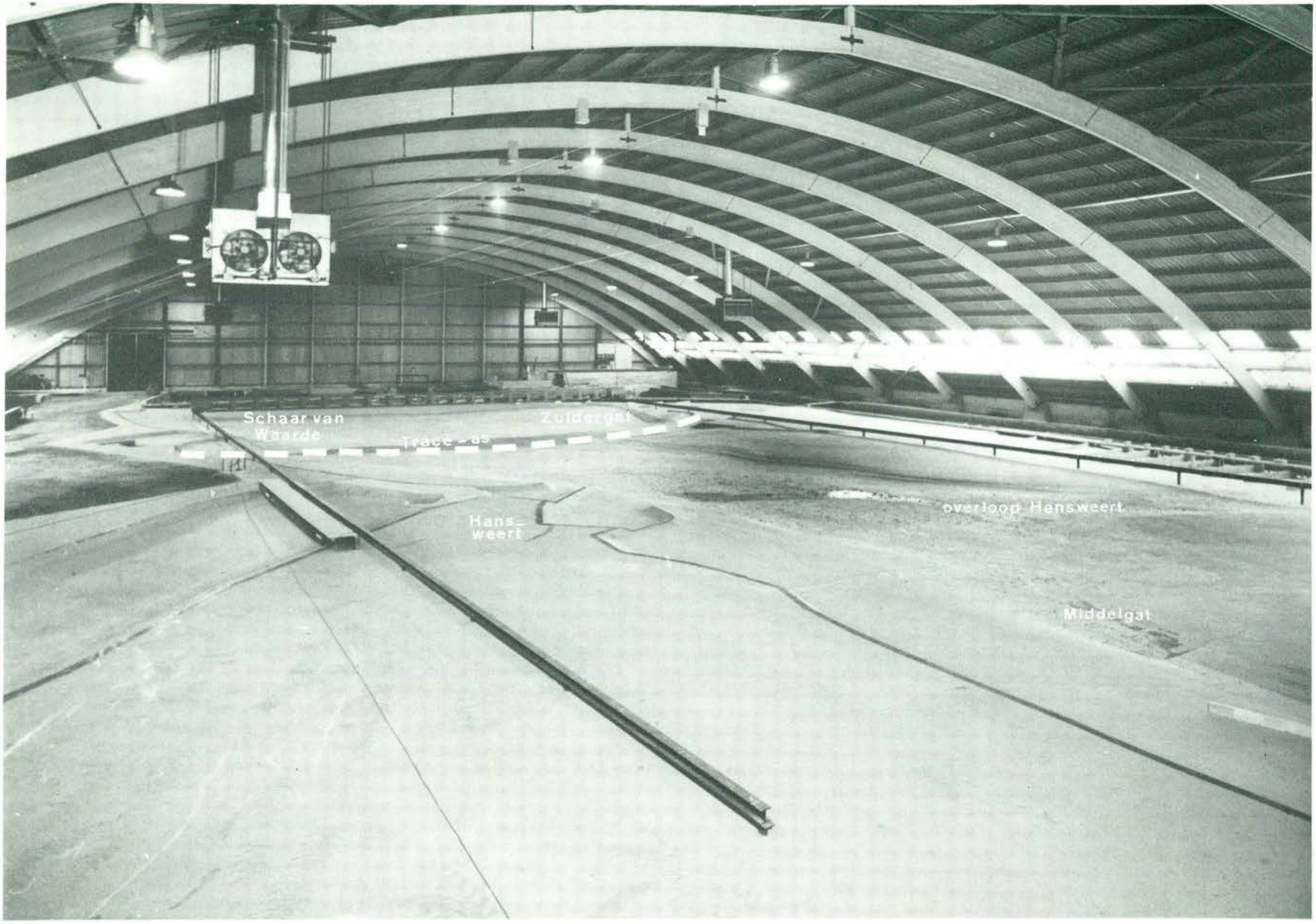
M 1734

FIG. 69

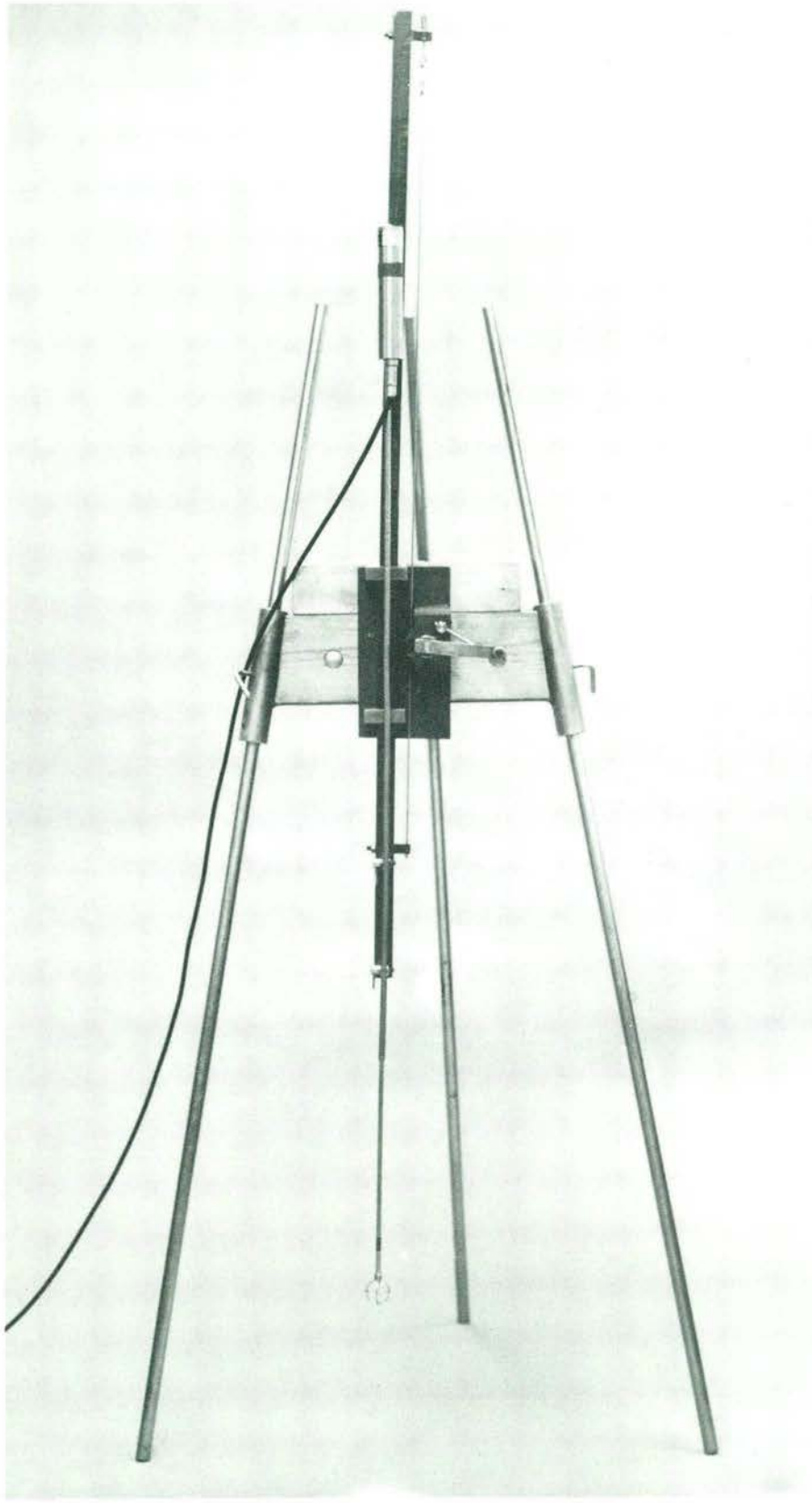


TIJD - ONTGRONDINGSLIJN

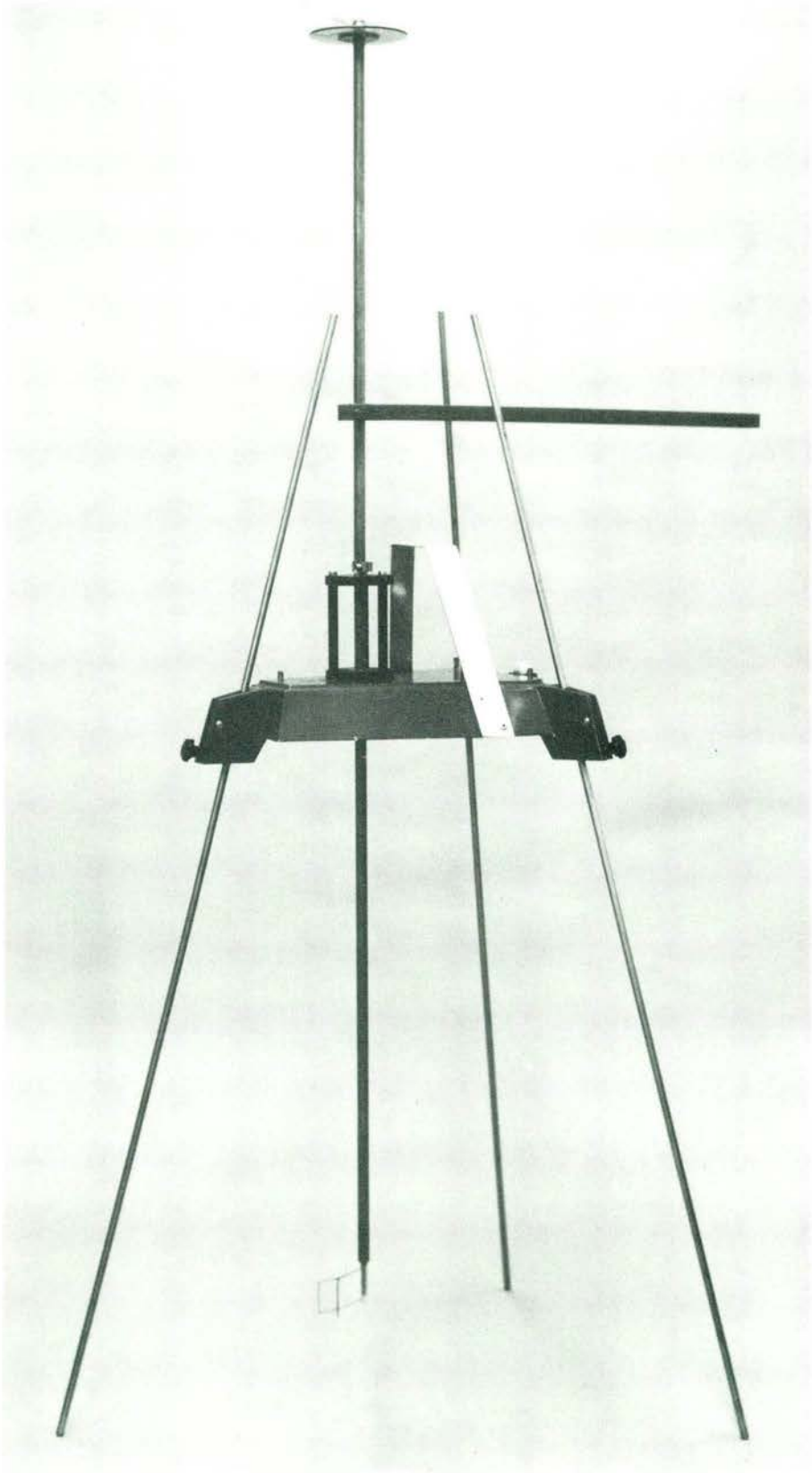
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM | M 1734 | FIG. 70



1. Overzicht van het model

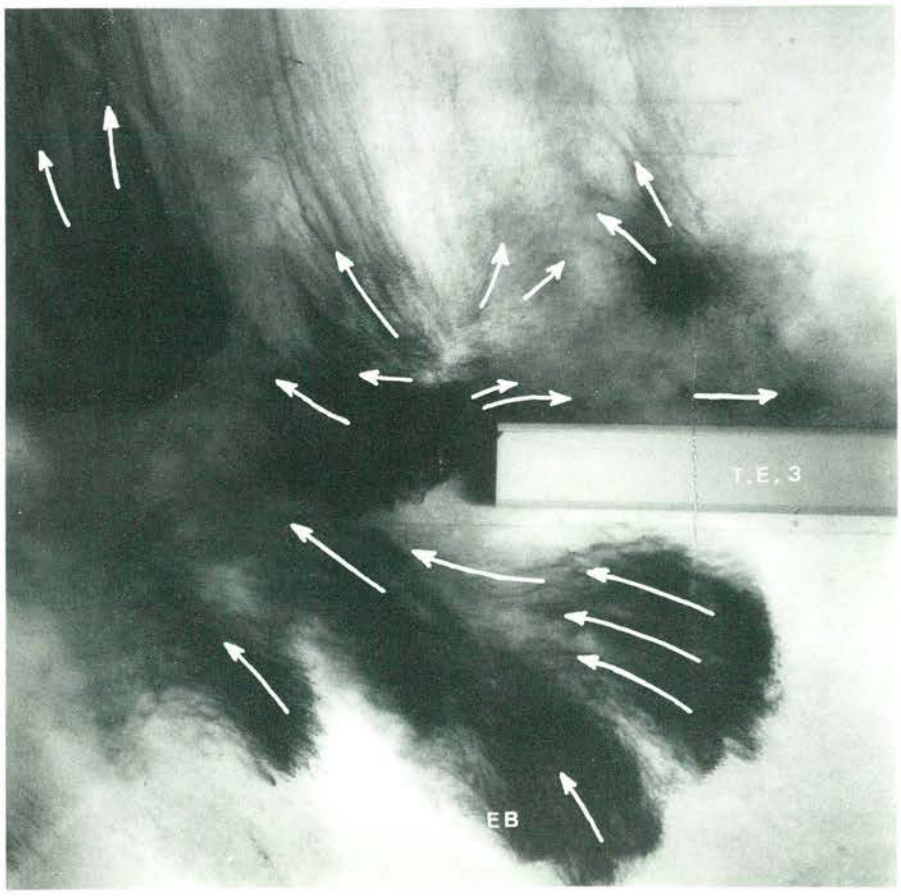


2. Stroomsnelheidsmolen

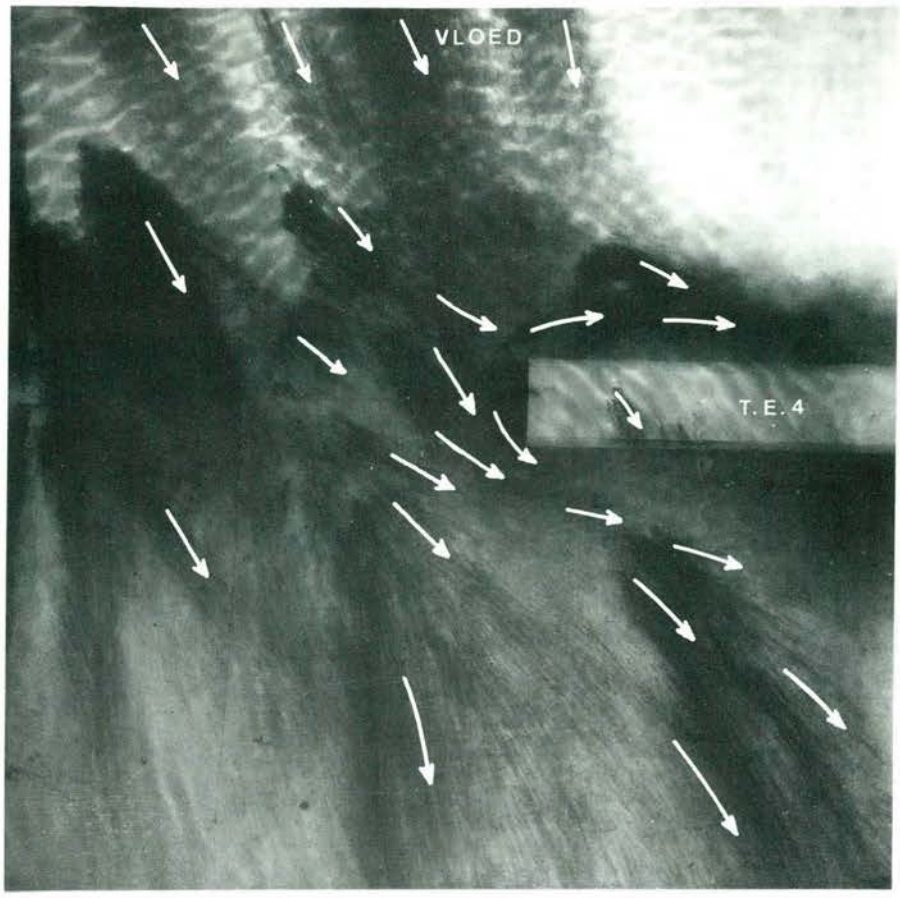


3. Stroomrichtingsvaan

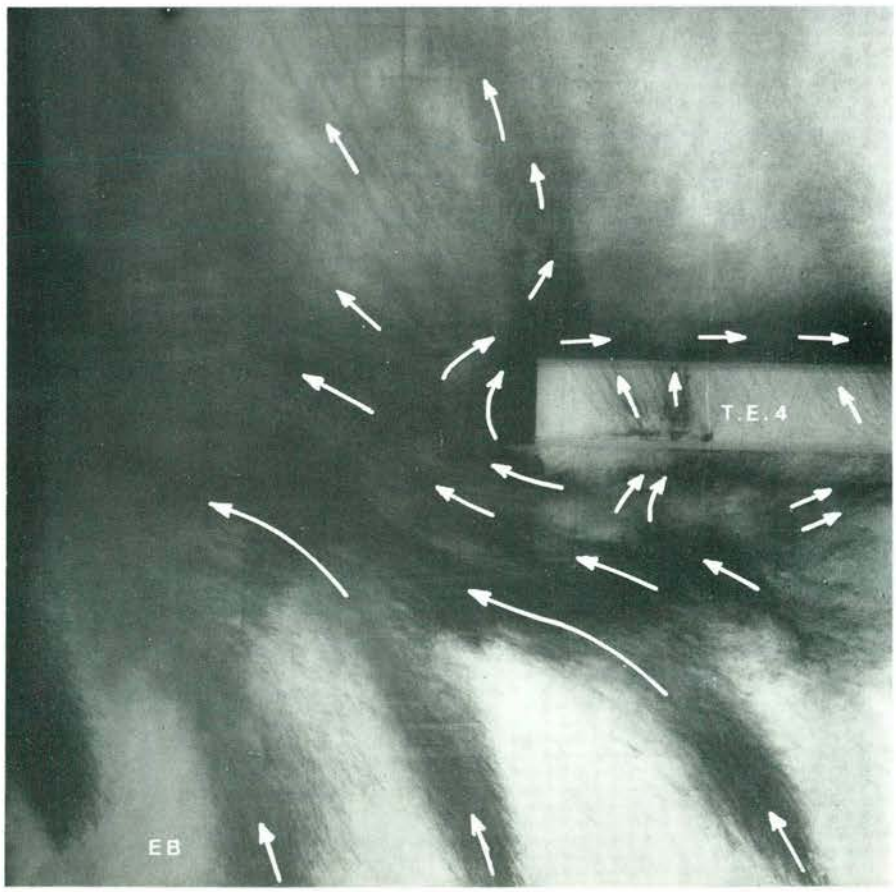
4. Stroomrichtingen langs bodem (T3, vloed)



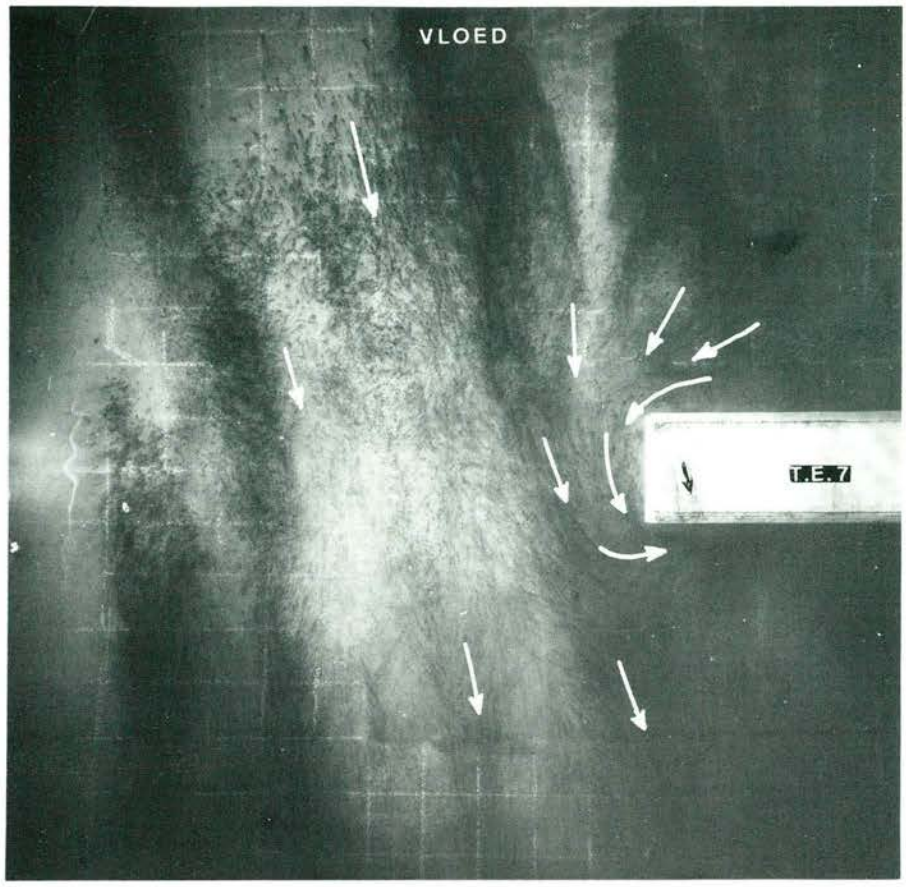
5. Stroomrichtingen langs bodem (T3, eb)



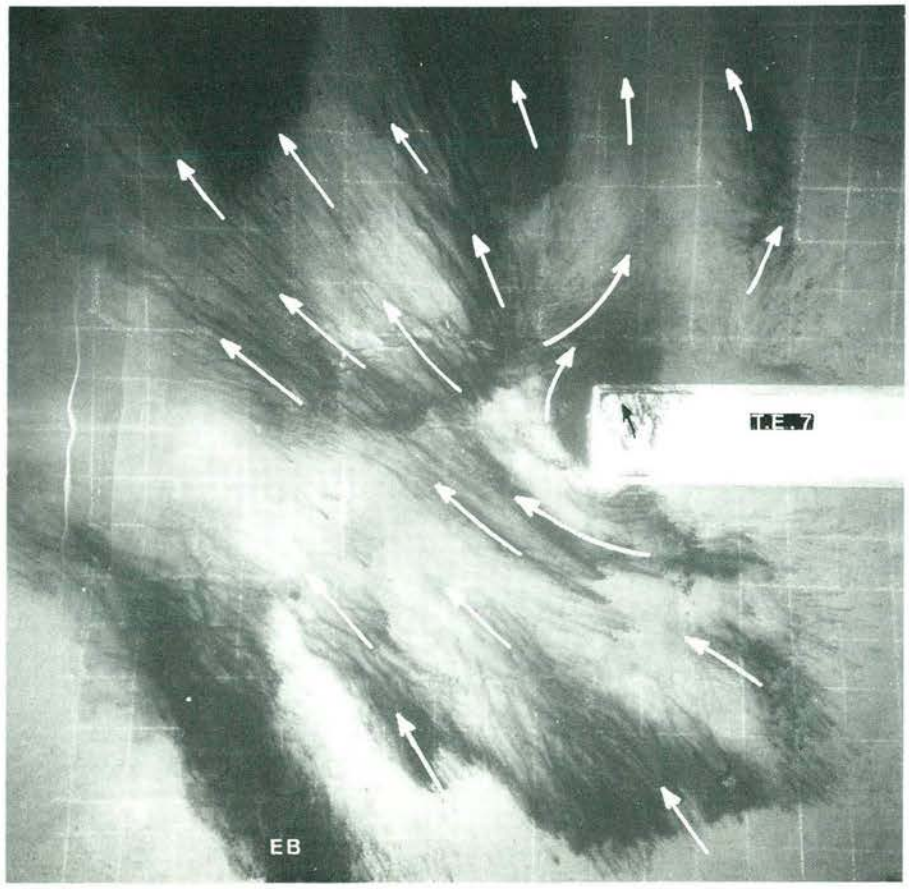
6. Stroomrichtingen langs bodem (T4, vloed)



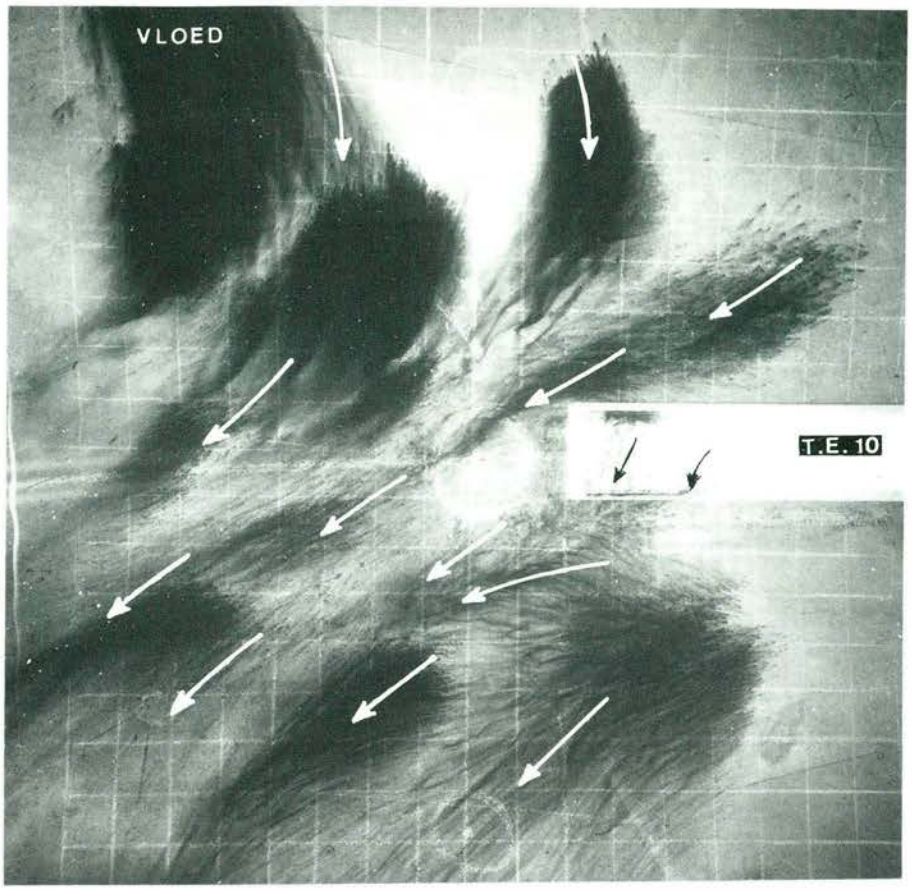
7. Stroomrichtingen langs bodem (T4, eb)



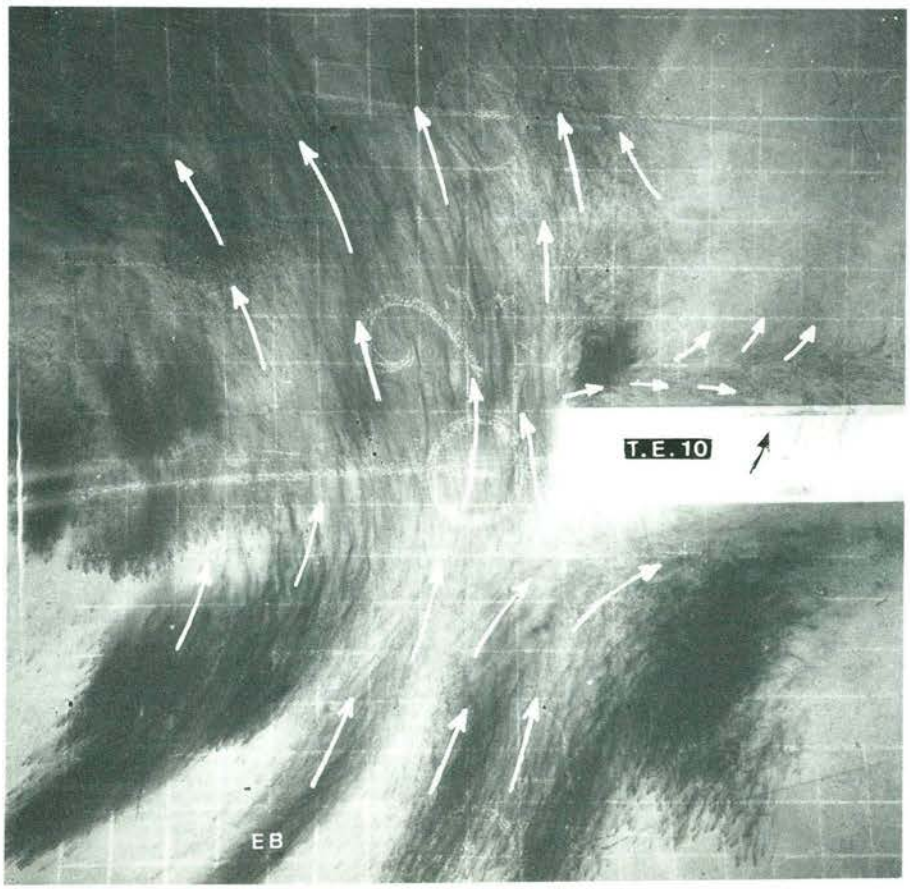
8. Stroomrichtingen langs bodem (T5, vloed)



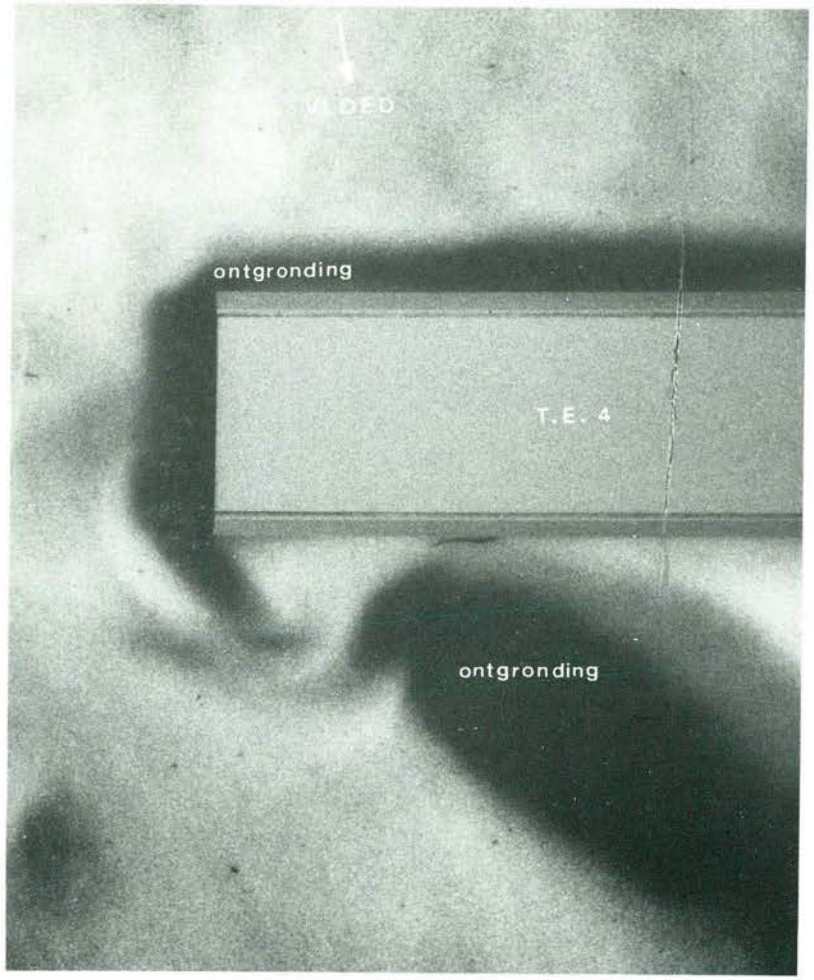
9. Stroomrichtingen langs bodem (T5, eb)



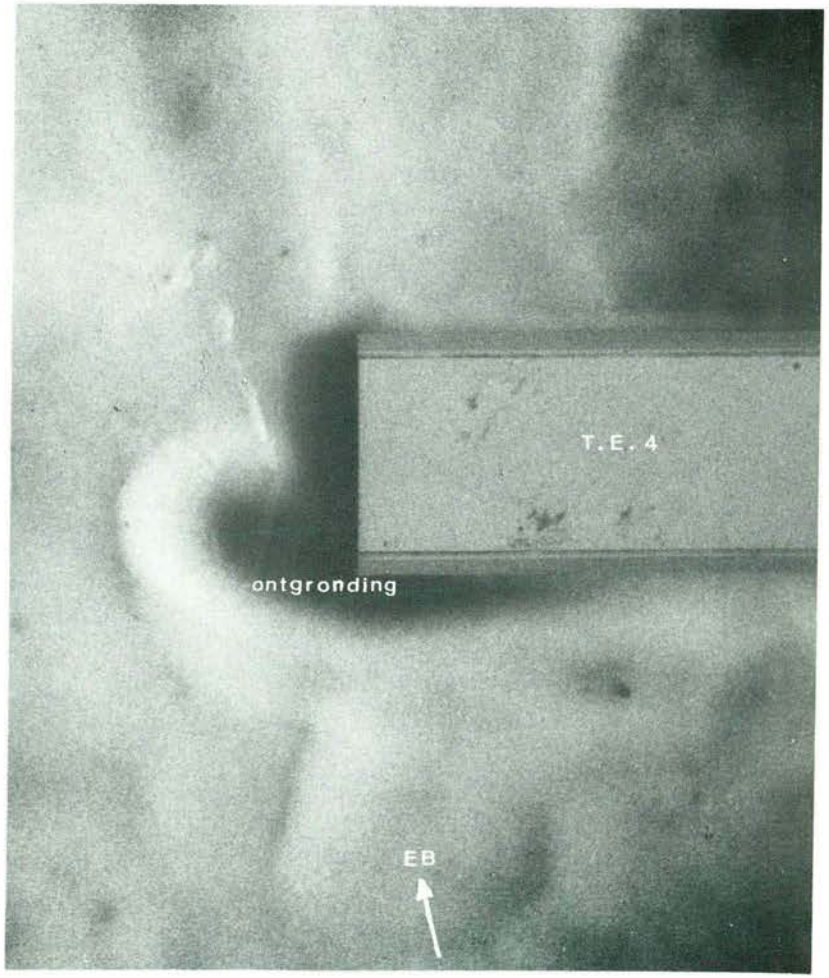
10. Stroomrichtingen langs bodem (T6, vloed)



11. Stroomrichtingen langs bodem (T6, eb)

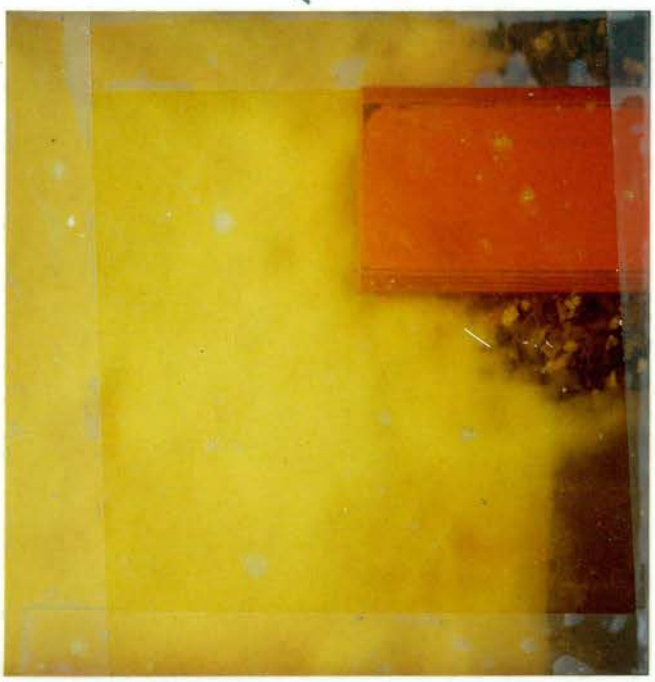


12. Ontgronding langs tunnelelement 4 (T4, vloed)



13. Ontgronding langs tunnelelement 4 (T4, eb)

stroomrichting



1. begin proef

2. na 15 sek.
(maximale ontgronding ca. 0,01 m)

3. na 140 sek.

4. na 195 sek.
(maximale ontgronding ca. 0,02 m)

14. Ontgronding langs tunnelelement 7 (T5, vloed)

stroomrichting

5. na 230 sek.

6. na 270 sek.

7. na 300 sek.
(maximale ontgronding ca. 0,03 m)

8. na 355 sek.

14. (vervolg) Ontgronding langs tunnelelement 7 (T5, vloed)

stroomrichting

9. na 405 sek.

10. na 455 sek.

11. na 495 sek.
(maximale ontgronding ca. 0,04 m)

12. na 600 sek.

14. (vervolg) Ontgronding langs tunnelelement 7 (T5, vloed)

p.o. box 177 2600 mh delft • the netherlands